



**Diplomarbeit**

# **Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen**

Eine bewertende Gegenüberstellung in Hinblick auf die Zukunfts-  
chancen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

**Diplom-Ingenieurs**

unter der Leitung von

**Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Klamer**

**Fachbereich für Verkehrssystemplanung**

A-1040 Wien, Gußhausstraße 30/269

Tel.: +43-1-58801-26901

von

**Johannes Zeilinger, BSc**

0525118

Oberradl 3, 3383 Hürm

Oberradl, am \_\_\_\_\_

*"Vorhersagen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen"*

*Niels Bohr<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Kemp 2001: S. 921

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet zu haben.

---

Oberradl am

---

Johannes Zeilinger

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Diplomarbeit und während der Zeit meines Studiums unterstützt und gefördert haben.

Mein Dank gilt meinem Erstbetreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Klamer für die Hilfestellungen, Anregungen und wertvollen Ratschläge beim Erstellen der Diplomarbeit.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, Gerhard und Marianne, die mich während meiner Studienzeit finanziell gefördert und mich unterstützt haben.

Auf diesem Weg möchte ich auch all meinen Freunden und meinen 2 Geschwistern, Gerhard und Ulrike, danken, welche immer ein offenes Ohr für mich hatten und mir immer fachlich mit Rat und Tat zur Seite standen. Des Weiteren sorgten sie während meiner Studienzeit für unzählige Stunden an Unterhaltung und Spaß.

Der größte Dank gilt aber dir, Jutta. Du hast mich immer wieder motiviert und bist mir in allen Lebenslagen beigestanden. Du hast mich in allen meinen Entscheidungen unterstützt. Du warst immer für mich da und hast mir Halt gegeben. Ohne dich hätte ich vieles nicht geschafft. Ich danke dir für alles, dass du für mich getan hast.

Live long and prosper!

Johannes Zeilinger

Anmerkung

In dieser Diplomarbeit wird auf geschlechtsspezifische Formulierungen verzichtet. Sämtliche personen- und funktionsbezogene Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen und beziehen sich inhaltlich sowohl auf die weibliche als auch auf die männliche Form.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	12
Abstract.....	13
1 Einleitung .....	14
1.1 Motivation .....	15
1.2 Problemstellung.....	16
1.3 Grenzen der Arbeit .....	18
1.4 Relevanz für die Raumplanung.....	18
1.5 Forschungsfragen.....	19
1.6 Methodik.....	19
1.7 Gliederung der Arbeit.....	20
2 Aktueller Stand des Energiebedarfs .....	22
2.1 Energiebedarf an fossilen Rohstoffen .....	22
2.2 Begrenztheit der Ressourcen.....	24
2.3 Umweltbelastung .....	27
2.3.1 Gesetzlich limitierte Emissionen .....	28
2.3.2 Nichtlimitierte Emissionen.....	29
2.3.3 Kyoto – Protokoll .....	29
2.4 Bestehende Mobilitätsmuster.....	32
3 Geschichte der Personenkraftwagen.....	35
4 Traditionelle Antriebsformen und Energieträger .....	43
4.1 Technische Grundlagen der Antriebe.....	43
4.1.1 Hubkolbenmaschine .....	43
4.1.2 Kreiskolbenmaschine .....	44
4.2 Arbeitsverfahren der Antriebe .....	45
4.2.1 Viertaktverfahren .....	45
4.2.2 Zweitaktverfahren .....	46

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

4.3 Ottomotor.....	47
4.4 Dieselmotor .....	48
4.5 „Ein Liter Auto“ .....	49
4.5.1 Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch .....	50
4.5.2 Konzepte auf dem Weg .....	51
4.5.2.1 Leichtbauweise.....	51
4.5.2.2 Antriebsstrategie .....	52
4.5.2.3 Aerodynamik .....	53
4.5.3 Bewertung des Systems .....	53
4.5.3.1 SWOT-Analyse des Ein-Liter-Autos.....	53
4.5.3.2 Stand der Technik und Kosten .....	54
4.5.3.3 Versorgungsinfrastruktur .....	55
4.5.3.4 Verfügbarkeit der Ressourcen .....	55
4.5.4 Praxisbeispiele .....	56
4.5.5 Zusammenfassung Ein-Liter-Auto .....	60
4.6 Benzin und Diesel.....	60
4.7 SWOT-Analyse von Otto- und Dieselmotoren.....	64
5 Alternative Antriebsformen .....	65
5.1 Hybridantrieb .....	66
5.1.1 Strukturvarianten .....	66
5.1.1.1 Serieller Hybridantrieb .....	67
5.1.1.2 Paralleler Hybridantrieb .....	68
5.1.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb.....	69
5.1.2 Der Energiespeicher .....	70
5.1.3 Betriebsstrategie.....	71
5.1.4 Bewertung des Systems .....	72
5.1.4.1 SWOT-Analyse der Hybrid-Technologie.....	73
5.1.4.2 Versorgungsinfrastruktur .....	74
5.1.4.3 Betriebskosten.....	74
5.1.5 Marktchancen.....	75

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

5.1.6 Praxisbeispiele .....	76
5.1.7 Zusammenfassung Hybridantrieb .....	77
5.2 Alternative Kraftstoffe .....	79
5.2.1 Diesel-Alternativen .....	80
5.2.1.1 Biodiesel.....	80
5.2.1.2 Pflanzenöl .....	81
5.2.2 Benzin Alternativen.....	83
5.2.2.1 Bio-Ethanol.....	83
5.2.2.2 Biogas .....	84
5.2.2.3 Flüssiggas (LPG).....	84
5.2.2.4 Erdgas (CNG).....	87
5.2.5 Bewertung der Systeme .....	88
5.2.5.1 SWOT-Analyse der alternativen Kraftstoffe .....	88
5.2.5.2 Versorgungsinfrastruktur .....	90
5.2.5.3 Rechtliche Aspekte.....	90
5.2.5.4 Verfügbarkeit der Rohstoffe.....	91
5.2.5.5 Betriebskosten.....	91
5.2.6 Praxisbeispiele .....	92
5.2.7 Zusammenfassung Alternative Kraftstoffe .....	93
5.3 Batterieelektrische Antriebe .....	95
5.3.1 Elektromotoren .....	95
5.3.1.1 Gleichstrommotoren .....	96
5.3.1.2 Drehstrommotoren .....	96
5.3.2 Batteriesysteme.....	97
5.3.2.1 Bleiakкумуляtor .....	98
5.3.2.2 Nickel-Cadmium Batterie.....	98
5.3.2.3 Nickel-Metallhydrid Batterie.....	99
5.3.2.4 Lithium-Ionen Batterie .....	99
5.3.2.5 ZEBRA Batterie .....	99
5.3.3 Reichweiten von Elektroautos.....	100



## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

5.3.4 Herkunft des elektrischen Stroms .....	101
5.3.5 Bewertung des Systems .....	102
5.3.5.1 SWOT-Analyse der batterieelektrischen Antriebe .....	102
5.3.5.2 Versorgungsinfrastruktur .....	103
5.3.5.3 Verfügbarkeit der Ressourcen .....	104
5.3.5.4 Betriebskosten.....	105
5.3.6 Praxisbeispiele .....	106
5.3.7 Zusammenfassung Batterieelektrische Antriebe .....	109
5.4 Solarantrieb .....	111
5.4.1 Funktionsprinzip Photovoltaik .....	111
5.4.2 Arten von Solarzellen .....	112
5.4.2.1 Kristalline Silizium-Solarzellen .....	112
5.4.2.2 Dünnschicht-Solarzellen .....	115
5.4.2.3 Galliumarsenid-Solarzellen.....	115
5.4.2.4 Wirkungsgrade .....	116
5.4.3 Bewertung des Systems .....	117
5.4.3.1 SWOT-Analyse der solarbetriebenen Fahrzeuge .....	117
5.4.3.2 Versorgungsinfrastruktur für solarbetriebene Fahrzeuge .....	118
5.4.3.3 Stand der Technik .....	118
5.4.4 Praxisbeispiele .....	119
5.4.5 Zusammenfassung .....	121
5.5 Wasserstoff - Verbrennungsmotor .....	123
5.5.1 Gewinnung von Wasserstoff .....	124
5.5.1.1 Erdgas.....	124
5.5.1.2 Wasser .....	124
5.5.1.3 Weitere Methoden .....	125
5.5.2 Speicherung von Wasserstoff .....	126
5.5.2.1 Flüssige Speicherung .....	126
5.5.2.2 Druckspeicherung .....	127
5.5.3 Chemische Eigenschaften .....	127

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

5.5.4 Funktionsweise des Wasserstoff - Verbrennungsmotor .....	128
5.5.5 Sicherheit von Wasserstoff .....	129
5.5.6 Bewertung des Systems .....	131
5.5.6.1 SWOT-Analyse des Wasserstoff-Verbrennungsmotors .....	131
5.5.6.2 Versorgungsinfrastruktur .....	133
5.5.6.3 Verfügbarkeit der Ressourcen .....	134
5.5.6.4 Parken in Garagen .....	135
5.5.6.5 Rechtliche Aspekte.....	136
5.5.7 Praxisbeispiele und Betriebskosten .....	136
5.5.8 Zusammenfassung Wasserstoff-Verbrennungsmotor .....	139
5.6 Brennstoffzelle.....	142
5.6.1 Funktionsweise der Brennstoffzelle .....	142
5.6.2 Typen von Brennstoffzellen .....	144
5.6.2.1 Alkalische Brennstoffzelle (AFC) .....	144
5.6.2.2 Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM).....	145
5.6.2.3 Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC).....	148
5.6.2.4 Carbonat-Schmelze-Brennstoffzellen (MCFC).....	149
5.6.2.5 Oxid-Keramik-Brennstoffzelle (SOFC).....	149
5.6.3 Treibstoffe für Brennstoffzellen .....	151
5.6.4 Bewertung des Systems .....	151
5.6.4.1 SWOT-Analyse der Brennstoffzelle .....	151
5.6.4.2 Versorgungsinfrastruktur .....	152
5.6.4.3 Verfügbarkeit der Ressourcen .....	153
5.6.4.4 Betriebskosten und Praxisbeispiele .....	153
5.6.5 Zusammenfassung Brennstoffzelle.....	155
6 Vergleich der alternativen Antriebsformen.....	157
6.1 Vergleichsmatrix der alternativen Antriebe.....	157
6.2 Well-to-Wheel-Analyse alternativer Antriebe.....	164
7 Szenarien bis 2030.....	170
7.1 Methodisches Vorgehen .....	170

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

7.1.1 Zeitlicher und örtlicher Bezug .....	170
7.1.2 Datengrundlagen .....	170
7.1.3 Vereinfachte Annahmen .....	171
7.2 Szenario "0-Fall" .....	172
7.3 Maßnahmen-Szenario .....	175
7.4 Vergleich der Szenarien.....	178
7.4.1 Schlussfolgerungen .....	179
7.4.2 Mögliche Handlungsoptionen des Staates .....	180
8 Schlussfolgerungen.....	182
9 Zusammenfassung.....	193
10 Abkürzungsverzeichnis.....	200
11 Abbildungsverzeichnis.....	201
12 Tabellenverzeichnis.....	203
13 Literaturverzeichnis .....	204

## Kurzfassung

**Hintergrund:** Die Zahl der Personenkraftwagen und die durchschnittlich zurückgelegten Wegelängen steigen weltweit kontinuierlich an. Auch in Zukunft ist weiter mit einem Anstieg der Motorisierung und der damit verbundenen Emissionen zu rechnen. Die für die Treibstoffe benötigten Rohstoffe, vor allem Erdöl und Erdgas, sind nur begrenzt verfügbar.

**Ziel:** Ziel dieser Arbeit ist es, alternative Antriebsformen und alternative Kraftstoffe in Hinblick auf ihre Potenziale zu untersuchen. Gemessen werden sie an den auf dem Markt dominierenden Otto- und Dieselmotoren. Vergleichskriterien sind unter anderem Reichweite, Nachhaltigkeit, Stand der Technik und Effizienz.

**Methode:** Alle alternativen Antriebsformen und Kraftstoffe werden kurz erklärt, ihre Funktionsweisen und die benötigten Rohstoffe werden erläutert. In einer SWOT-Analyse werden Stärken und Schwächen ausgelotet. Des Weiteren wird die benötigte Versorgungsinfrastruktur skizziert und Praxisbeispiele werden vorgestellt. In zwei Szenarien wird versucht unterschiedliche Entwicklungen auf dem Markt darzustellen. In einer direkten Gegenüberstellung werden die Alternativen übersichtlich miteinander verglichen.

**Ergebnisse:** Der Hybridantrieb und das Ein-Liter-Auto können nur kurzfristige Alternativen zur Senkung des Flottenverbrauchs darstellen. Alternative Kraftstoffe sind schon heute in vielfältiger Form auf dem Markt erhältlich. Batterieelektrische Antriebe stellen bereits jetzt eine vernünftige Alternative zu Otto- und Dieselmotoren dar, einzig der Kaufpreis ist noch zu hoch. Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor und die Brennstoffzelle bieten langfristig großes Potenzial für die Zukunft, hier muss allerdings noch die Herstellung des Treibstoffs effizienter gestaltet werden. Beinahe alle Alternativen sind bei den verursachten Emissionen in Hinsicht auf die komplette Kette zumindest etwas besser als Benzin und Diesel, jedoch bieten einige keine entscheidenden Vorteile.

**Schlussfolgerung:** Alle alternativen Antriebe und Kraftstoffe haben sowohl Vorteile als auch Nachteile. Welche Alternative sich auf dem Markt durchsetzen wird, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab: vom Einsatzzweck des PKWs, von den zukünftigen Entwicklungen der Benzin- und Dieselpreise, von der Errichtung der benötigten Infrastruktur und vom Fortschritt der technischen Weiterentwicklung. Aus den Szenarien lässt sich ablesen, dass eine unkontrollierte Entwicklung auf dem Markt für PKW-Antriebe nicht zielführend ist. Der Staat muss hier regulierend eingreifen um eine raschere Entwicklung zu nachhaltigen und ökologisch sinnvoller Alternativen zu gewährleisten.

**Schlüsselbegriffe:** alternative Antriebe, alternative Kraftstoffe, Brennstoffzelle, Wasserstoff, Biodiesel, Erdgas, LPG, Biogas, Ottomotor, Dieselmotor, Wasserstoff-Verbrennungsmotor, Niedrigenergieauto, Solarauto, batterieelektrischer Antrieb, Verkehrs – Szenarien

### Abstract

**Background:** The number of passenger vehicles and the average distances covered are rising continuously all over the world. Thus, an increase in motorisation and emissions can be expected in the future. Raw material, such as crude oil and natural gas, which is needed for the production of fuel, is finite / only available to a limited extent.

**Aims:** This thesis aims to investigate alternative drive forms and fuels regarding their potentials. They are compared to the Otto and diesel engines, which are so far dominating the market. The criteria for comparison include cruising range, sustainability, state of the technology and efficiency.

**Method:** All alternative drive forms and fuels are briefly explained, their functionality / mode of operation and the required raw materials are commented on. A SWOT analysis is used to demonstrate strengths and weaknesses. Moreover, the infrastructure for supply and maintenance is outlined and practical examples are given. The diverse developments on the market are illustrated by painting / describing two scenarios. The alternatives are then compared in a structured overview.

**Results:** The hybrid-electric power train / hybrid drive / composite engine and the 1-litre car are only very short term alternatives to reduce the fleet consumption. There is a range of alternative fuels available on the market. Battery-powered electric engines constitute a reasonable alternative to Otto and diesel engines. However, the purchasing price is still too high. The hydrogen combustion engine and the fuel cell show great potential in the long run; the production of the fuel has to be made more efficient though. Considering the emissions caused it can be said that nearly all alternatives are at least insignificantly better than petrol and diesel, but some of them do not entail decisive advantages.

**Conclusion:** All alternative drive forms and fuels have both their benefits and drawbacks. A number of factors will decide which of the alternatives will establish itself on the market: the intended use of the vehicle, the future development of petrol and diesel prices, the construction of the required infrastructure and the progress of technical development. The scenarios reveal that an uncontrolled development of vehicle drive forms is leading nowhere on the market. The government has to regulate the process in order to safeguard an efficient and expeditious development of sustainable and environmentally wise alternatives.

**Key terms:** alternative drive forms, alternative fuels, fuel cell, hydrogen, biodiesel, natural gas, liquefied petroleum gas, biogas, Otto engine, Diesel engine, hydrogen combustion engine, low-energy vehicle, solar-powered car, battery-powered electric engine, traffic scenarios

## 1 Einleitung

*„Die Zunahme der Weltbevölkerung, die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe und deren geografisch ungleiche Verteilung, die steigende Umweltbelastung durch die Emission von Schadstoffen sowie der Klimawandel zählen zu den größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts“<sup>2</sup>*

Dieses Zitat charakterisiert in einem Satz die beiden grundlegenden Nachteile fossiler Rohstoffe (in diesem Fall besonders Erdöl) in der Automobilindustrie: Ihr Verbrauch ist umweltschädlich und die Ressourcen sind begrenzt.

Bedingt durch die Endlichkeit fossiler Rohstoffe auf der Erde und die stetige Zunahme der Mobilität, hier vor allem in Asien, müssen andere Arten von Automobilantrieben entwickelt werden um den stetig steigenden Mobilitätsansprüchen auch in Zukunft gerecht zu werden. Auch das ständig steigende Umweltbewusstsein trägt dazu bei, alternative, umwelt- und klimafreundliche Antriebsformen weiterzuentwickeln und am Markt zu etablieren.

Ziel dieser Arbeit ist es alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen zu beschreiben, grob ihre Funktionsmechanismen zu erklären und ihr Potenzial sich bis zum Jahr 2030 auf dem Markt zu etablieren zu untersuchen.

Hauptaugenmerk liegt hierbei nicht auf den technischen Aspekten sondern vielmehr auf den Chancen und Potenzialen der einzelnen Alternativen bis zum Jahr 2030 in großem Maße die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen bei Personenkraftwagen zu verringern.

Das Potenzial der einzelnen Alternativen soll mittels folgender Kriterien ermittelt werden:

- Stand der Technik: Wirkungsgrade im Vergleich herkömmlichen Motoren (Ottomotor, Dieselmotor)
- Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen (Nachhaltigkeit und Erneuerbarkeit)
- Benötigte Versorgungsinfrastruktur (Tankstellen, Raffinerien)
- Umweltfreundlichkeit (Ausstoß von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen)
- Geschätzte Anschaffungs- und Betriebskosten

---

<sup>2</sup> Eichlseder H., Klell M. (2008): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Vieweg & Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008

Um die möglichen Entwicklungen möglichst breit gefächert darzustellen und verschiedene Varianten zu beleuchten werden 2 verschiedene Szenarien definiert und die sich dadurch verändernden Entwicklungen dargestellt:

- **Szenario „0-Fall“**

Der Ölpreis steigt wie bisher leicht an. Die Weiterentwicklung von Alternativen wird mit demselben Tempo wie heute vorangetrieben.

- **Maßnahmen-Szenario**

Der Umweltgedanke und die Nachhaltigkeit der Mobilität werden immer wichtigere Faktoren, es wird rasch an vernünftigen Alternativen gearbeitet. Steuerliche Erhöhungen für fossile Brennstoffe und Unterstützung der Forschung werden impliziert.

### 1.1 Motivation

Im Verkehrswesen treffen zunehmend entgegengesetzte Ansprüche und Wünsche aufeinander.

Auf der einen Seite steigt der Motorisierungsgrad von Personenkraftwagen in allen Teilen der Welt kontinuierlich, so zum Beispiel in Österreich um circa 3% jährlich auf zuletzt durchschnittlich 512 PKW je 1000 Einwohner<sup>3</sup>. China, der größte Wachstumsmarkt für Personenkraftwagen weist zurzeit einen Motorisierungsgrad von 26 PKW je 1000 Einwohner auf, dies entspricht der Motorisierung von Österreich im Jahr 1955. Allerdings wird jedes zehnte neue Auto in China verkauft<sup>4</sup>.

Weiters steigt auch die Mobilität an sich. Es werden immer weitere Strecken zurückgelegt. So zum Beispiel stieg die durchschnittliche Tagesweglänge in Österreich an einem Werktag 1995 29 km, im Jahr 2005 waren es bereits 43 km.<sup>5</sup>

Bedingt durch die steigende Motorisierung und die steigende Mobilität steigt auch der Energieverbrauch bei Personenkraftwagen. Der für das Verkehrswesen besonders wichtige Rohölverbrauch stieg im Jahr 2005 um 1,3%, der Erdgasverbrauch um 2,3%. Es gibt sehr unterschiedliche Meinungen bezüglich der Reichweite der derzeit bekannten Reserven fossiler Rohstoffe und noch unentdeckter Reserven. Jedenfalls ist davon auszuge-

<sup>3</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:72

<sup>4</sup> Vgl. VCÖ: <http://www.vcoe.at/start.asp?ID=4157&b=92> (abgerufen am 31.03.2010)

<sup>5</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:86ff

hen, dass deren Vorkommen endlich ist und dass durch Verknappung Preissteigerungen zu erwarten sind.<sup>6</sup>

Durch steigenden Verbrauch nehmen auch die Umweltbelastungen zu. Vor allem der zu einem großen Teil durch den Verkehr verursachte Treibhauseffekt trägt zur klimatischen Veränderung auf der Erde bei. Hauptverursacher ist  $\text{CO}^2$  welches bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen ( $\text{C}^x\text{H}^y$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}^2$ ) entsteht. Bei der Verbrennung von 1kg Benzin oder Diesel entstehen circa 3,2 kg  $\text{CO}^2$ . Der natürliche Treibhauseffekt stellt sicher, dass die durchschnittliche Temperatur auf der Erde circa 15°C beträgt. Durch die vom Menschen ausgestoßenen Mengen an Treibhausgasen wird, je nach Szenario, angenommen, dass die durchschnittliche Temperatur bis zum Jahr 2100 zwischen 2°C und 6°C steigt. Folgen wären das Abschmelzen der Polkap pen, das Steigen des Meeresspiegels und Wetterextreme<sup>7</sup>, was drastische Veränderungen im Leben vieler Erdenbewohner nach sich ziehen würde.

Den Nutzungsansprüchen stehen Werte wie Nachhaltigkeit und Ökologisierung gegenüber. Der Natur- und Umweltschutz gerät immer stärker in den Fokus der Öffentlichkeit, Nachhaltigkeit wird immer öfter als zukunftsweisendes Konzept dargestellt, dass, vor allem im Verkehrswesen, zurzeit allerdings in großem Maßstab noch nicht realisierbar ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf dem Sektor der Personenkraftwagen diese divergierenden Ansprüche und Vorstellungen zu vereinen und nachhaltige, ökologische sinnvolle, Alternativen zum Otto- und Dieselmotor zu finden, diese zu beschreiben und ihre Chancen sich bis zum Jahr 2030 auf dem Automobilmarkt zu etablieren.

### 1.2 Problemstellung

Das gesamte Transportwesen (inklusive Gütertransport sowie Flugzeug- und Schiffsverkehr), hier vor allem auch die Personenkraftwagen, verbrauchen derzeit beinahe 50% des geförderten Erdöls. Die folgende Grafik zeigt den globalen Erdölverbrauch aufgeteilt nach Sektoren.

---

<sup>6</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 3ff

<sup>7</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 6



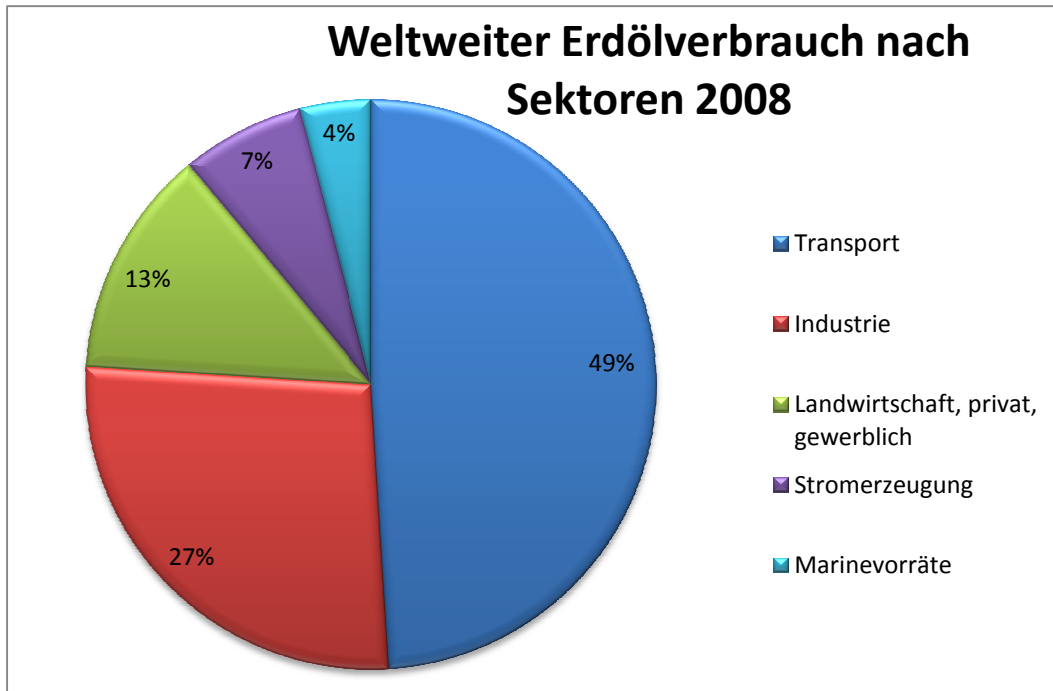


Abb. 1: Erdölverbrauch nach Sektoren

Obwohl der Kraftstoffverbrauch seit Jahren kontinuierlich gesenkt wird wirkt sich dies durch weitere Wegstrecken und durch zusätzlich benutzte Zusatzaggregate im Wagen (Klimaanlage, Navigationssystem) nicht auf den Gesamtverbrauch an Erdöl aus<sup>8</sup>. Um von der Abhängigkeit vom Erdöl im Verkehrssektor loszukommen müssen marktfähige Alternativen geschaffen werden. Diese Arbeit versucht deren Zukunftsperspektiven aufzuzeigen.

Zuerst muss allerdings geklärt werden wie der derzeitige Bestand bei Personenkraftwagen, der Energiebedarf auf dem Sektor der Personenkraftwagen, die Umweltbelastungen die durch den Personenverkehr generiert werden aussehen. Weiters müssen die bestehenden Mobilitätsmuster dargestellt werden um abschätzen zu können, was die Alternativen können müssen um am freien Markt bestehen zu können.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit gliedert sich in folgende Schritte:

- Darstellung der geschichtlichen Entwicklung von Personenkraftwagen
- Untersuchung und Analyse der derzeitigen Situation
- Darstellung der derzeitigen vorherrschenden Antriebsformen
- Darstellung der alternativen Antriebsformen
- Grobe Erklärung der des technischen Aufbaus der Alternativen
- Technischer Fortschritt und bereits durchgeführte Pilotprojekte von alternativen PKW-Antrieben

<sup>8</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG4

- SWOT – Analyse der Alternativen
- Vergleich der Alternativen untereinander
- Chancen der Einführung bei verschiedenen Szenarien

### **1.3 Grenzen der Arbeit**

Diese Arbeit kann allerdings keine zu 100% realistische Einschätzung der Zukunft liefern, vielmehr ist sie ein Wegweiser wie die zukünftige Entwicklung bei fortschreitendem Ressourcenverbrauch und fortschreitender technischer Entwicklung aussehen könnte. So zum Beispiel kann die Ölpreisentwicklung in den nächsten 20 Jahren nur grob abgeschätzt werden, da eventuelle neue Funde oder das Versiegen des Erdöls zur heutigen Zeit nicht vorhergesagt werden können.

Weiters können mögliche technische Neuerungen, die die Entwicklung von alternativen Antriebsformen in den nächsten 20 Jahren revolutionieren nicht in die Arbeit einfließen. Bereits über heutige Forschungen die noch nicht abgeschlossen sind lassen sich leider, auf Grund der Geheimhaltung der Entwickler, keine brauchbaren, wissenschaftlichen, Dokumente finden die für diese Arbeit von Relevanz sein könnten.

### **1.4 Relevanz für die Raumplanung**

Das Diplomarbeitsthema „Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen“ ist für das Fachgebiet der Raumplanung ein sehr technisches Thema. Allerdings besteht auch hier ein starker Bezug zur Raumplanung, im speziellen zur Verkehrsplanung.

Verkehrsplanung ist ein zentraler Bestandteil der Raumplanung sei es bei der Analyse von regionalen Zusammenhängen, bei der Bebauungsplanung oder bei der Erstellung von Landesraumordnungs-Konzepten oder örtlichen Entwicklungskonzepten. Die Industrie muss sicher stellen das Erreichbarkeit und Verfügbarkeit der Versorgungsinfrastrukturen gegeben sind, weiters muss sie für die Nachhaltigkeit der bestehenden Strukturen sorgen, dies trifft auch zu bei einem eventuellen Umstieg von fossilen Rohstoffen auf einen alternativen Energieträger. Die Verkehrsplanung kann in diesen Prozess mittels institutioneller Hilfe und finanzieller Unterstützung aus Fördertöpfen positiven Einfluss nehmen.

Eine weitere sehr wichtige Aufgabe der Verkehrsplanung ist es Wirkungen von Maßnahmen abzuschätzen, etwa vom Umstieg von fossilen Rohstoffen auf alternative Energieträger. Weiters beeinflussen verkehrsplanerische Entscheidungen die Verkehrsmittelwahl, so kann zum Beispiel in den Modal Split eingegriffen werden oder andere Antriebstechnologien können forciert werden, zum Beispiel durch eigene Fahrbahnen für Fahrzeuge mit erneuerbaren Energieträgern.

Diese Arbeit soll also auch die „raumplanerische“ Tauglichkeit von alternativen Antriebsformen beleuchten. So zum Beispiel wird an den derzeit bestehenden Mobilitätsmustern untersucht wie alltagstauglich die Alternativen sind und welche Fähigkeiten sie haben müssen um von potentiellen Käufern als seriöse Alternative wahrgenommen zu werden.

### 1.5 Forschungsfragen

Folgende Forschungsfragen sollen durch diese Arbeit aufgearbeitet und geklärt werden:

- Wie sieht die geschichtliche Entwicklung von Personenkraftwagen aus? Welche technologischen Entwicklungen prägen diese Industrie bis heute?
- Wie sieht der Ist-Situation aus (Energiebedarf, Umweltbelastung, Antriebsformen)?
- Wie sieht deren grobe Funktionsweise aus? Gibt es verschiedene Varianten? Wie sehen deren Wirkungsgrade aus?
- Welche Rohstoffe werden dazu benötigt, sind diese in ausreichendem Maße vorhanden, sind sie erneuerbar? Welche Versorgungsinfrastruktur wird benötigt?
- Welche Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken haben die einzelnen Alternativen?
- Wie sehen die Alternativen im direkten Vergleich aus?

### 1.6 Methodik

In diesem Kapitel soll kurz dargelegt werden, wie die Ergebnisse dieser Arbeit zustande gekommen sind und wie nach wissenschaftlicher Literatur gesucht wurde.

Zum Einlesen in das Thema wurde zuerst in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien nach passender Literatur recherchiert. Folgende Schlagwörter wurden hierbei in die Online – Suchmaske ALEPH<sup>9</sup> eingegeben:

„alternative Automobilantriebe, Ottomotor, Dieselmotor, Wasserstoff, Personenkraftwagen Verkehr und Umwelt, Brennstoffzelle, Solarantrieb, alternative Kraftstoffe, Biodiesel, Fahrzeugtechnik, innovative Automobilantriebe, Elektromobilität“

Auch diverse Online – Datenbanken<sup>10</sup> wurden auf der Suche nach wissenschaftlichen Artikeln durchstöbert, teilweise mit sehr geringem Erfolg. Die eingegebenen Schlagwörter waren die oben bereits genannten.

Wissenschaftliche Zeitschriften die, vor allem bei den sich rasch weiterentwickelnden Ingenieurwissenschaften, oftmals aktueller sind als Bücher wurden auf der Suche nach Pilotprojekten und den neuesten technischen Entwicklungen durchsucht. Benutzt wurde hierfür die Elektronische Zeitschriftenbibliothek der Technischen Universität Wien<sup>11</sup>.

Die dabei gefundenen Materialien wurden aufmerksam gelesen und Notizen wurden zu einem vorläufigen Inhaltsverzeichnis erstellt, welches sich im Laufe der Arbeit durch Umgliederungen, neue Erkenntnisse, Auslassungen und Einfügung neuen Materials allerdings oftmals änderte.

### 1.7 Gliederung der Arbeit

Die Diplomarbeit gliedert sich in 4 große Themenblöcke die aufeinander aufbauen und eng miteinander verzahnt sind:

Der erste Teil befasst sich mit der geschichtlichen Entwicklung von Personenkraftwagen. Hier sollen wichtige Entwicklungsschritte und technische Neuerungen chronologisch aufgearbeitet werden um das Verständnis für diese Materie zu erhöhen. Ein weiterer wichtiger Teil dieses Themenblockes befasst sich mit den aktuellen Gegebenheiten und Auswirkungen. Es soll geklärt werden wie viel Energie verbraucht wird und welche Auswirkungen daraus resultieren. Weiters werden die beiden derzeit vorherrschenden Antriebsformen näher erklärt, da sich die alternativen Antriebsformen immer an diesen messen

<sup>9</sup> Vgl. <http://aleph.ub.tuwien.ac.at/ALEPH> (abgerufen am 31.03.2010)

<sup>10</sup> Vgl. [http://rzblx10.uni-regensburg.de/dbinfo/dbliste.php?bib\\_id=ubtuw&colors=3&ocolors=40&lett=a](http://rzblx10.uni-regensburg.de/dbinfo/dbliste.php?bib_id=ubtuw&colors=3&ocolors=40&lett=a) (abgerufen am 31.03.2010)

<sup>11</sup> Vgl. <http://rzblx1.uni-regensburg.de/ezeit/search.phtml?bibid=UBTUW&colors=7&lang=de> (abgerufen am 31.03.2010)

lassen müssen. Zuletzt wird dargelegt über welche Fähigkeiten aus raumplanerischer Sicht die neuen Antriebsformen verfügen müssen um am Markt eine ernsthafte Konkurrenz zu Otto- und Dieselmotor darstellen zu können.

Der zweite Themenblock befasst sich daraufhin mit den alternativen Antriebsformen. Es wird deren grobe Funktionsweise beschrieben und welche Materialien und Rohstoffe dafür benötigt werden. In einer SWOT (Strengths – Weaknesses – Opportunities – Threats) – Analyse wird versucht ihre Potentiale aufzuzeigen. Weiters werden bereits bestehende Pilotprojekte und deren Ergebnisse kurz vorgestellt. Es wird versucht die einzelnen Alternativen nach einem möglichst gleichbleibenden Schema abzuhandeln um die Vergleichbarkeit zu erhöhen.

Der dritte Themenblock versucht die vorher vorgestellten alternativen Antriebsformen direkt anhand einer vorher definierten Checkliste in einer möglichst übersichtlichen Tabelle miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse daraus werden in verschiedenen Szenarien dargestellt die verschiedene Entwicklungswege für die Zeit bis 2030 darstellen sollen. So soll ein möglichst breites Spektrum an möglichen Entwicklungen abgedeckt werden.

Der letzte Themenblock soll die Ergebnisse nochmals zusammenfassen und anhand von präzisen Schlussfolgerungen darstellen. In der Zusammenfassung wird die gesamte Arbeit noch einmal abschließend dargestellt.

## 2 Aktueller Stand des Energiebedarfs

Kapitel 5 soll in dieser Arbeit eine Art von Bestandserhebung darstellen. Zunächst wird der durch den Verkehr auftretende Energiebedarf beschrieben, darauffolgend wird versucht darzustellen wie lange der Menschheit fossile Rohstoffe noch zur Verfügung stehen. Ein kurzer Abschnitt wird den durch den Verkehr auftretenden Umweltbelastungen gewidmet. Abschließend sollen die vorhandenen Mobilitätsmuster klären über welche Fähigkeiten die alternativen Antriebe verfügen müssen.

### 2.1 Energiebedarf an fossilen Rohstoffen

Ein wichtiger Grund für den stets steigenden Energiebedarf auf der Erde ist das Bevölkerungswachstum. Prognosen gehen davon aus, dass im Jahr 2050 circa 9 Milliarden Menschen auf der Erde leben werden.<sup>12</sup> Die folgende Grafik zeigt, dass das Bevölkerungswachstum allerdings nicht gleich verteilt ist, sondern sich vielmehr auf die Entwicklungs- und Schwellenländer konzentriert.

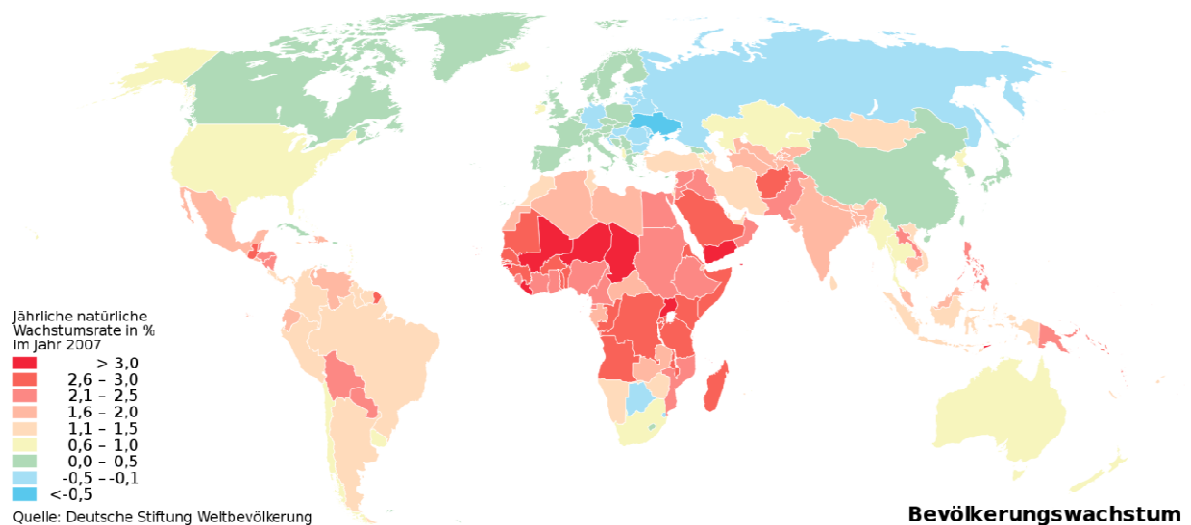


Abb. 2: Jährliches Bevölkerungswachstum im Jahr 2007<sup>13</sup>

In gleichem Maße wie die Anzahl der Menschen auf der Erde steigt, steigt auch die benötigte Energiemenge, doch darüber hinaus steigt auch noch die pro Kopf benötigte Energiemenge stetig an. Es wird pro Kopf allerdings nicht überall die gleiche Menge an Energie verbraucht. Die Vereinigten Staaten von Amerika (USA) liegen mit mehr als dem fünf-fachen des Weltdurchschnitts an der Spitze des Energieverbrauchs, gefolgt von Europa

<sup>12</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:21ff

<sup>13</sup> Quelle: Deutsche Stiftung für Weltbevölkerung, <http://www.dsw-online.de/> (abgerufen am 01.04.2010)

mit dem zweifachen des Weltdurchschnitts. Schwellenländer wie China und Indien liegen erst bei circa 50% bzw. 30% des Durchschnitts. Afrika ist weit abgeschlagen letzter mit 25% der Durchschnittsmenge. Der Energiekonzern BP erstellt jährlich eine statistische Vorschau<sup>14</sup>, aus diesem Bericht ist folgende Grafik die versucht den steigenden Energieverbrauch an Erdöl bildlich darzustellen.

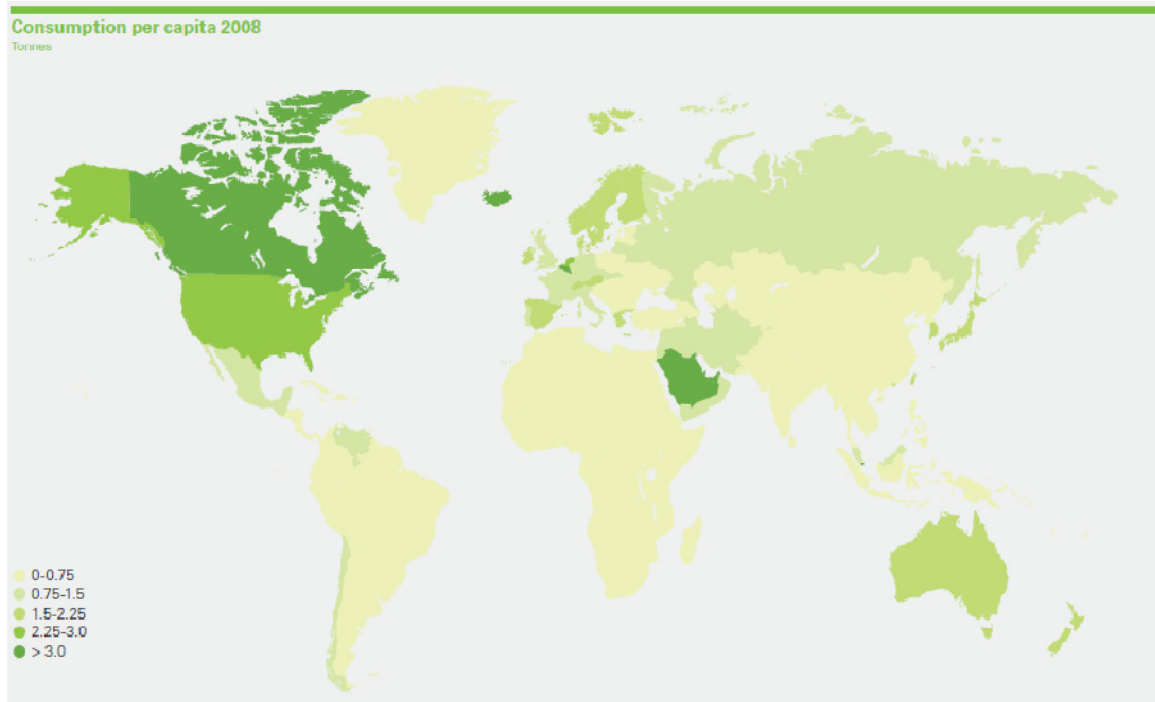


Abb. 3: Jährlicher pro Kopf Erdöl-Verbrauch 2008<sup>15</sup>

Der gesamte Verkehrssektor (inklusive Gütertransport, Flugzeug- und Schiffsverkehr) beansprucht beinahe die Hälfte des gesamten geförderten Erdöls für sich, und dieser Anteil wird in den nächsten Jahren, bei gleichbleibender Entwicklung, noch weiter steigen. Die Gesamtanzahl an Kraftfahrzeugen wird sich bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppeln, die Autoflotte wächst doppelt so schnell wie die Weltbevölkerung. Diese Fakten tragen dazu bei, dass der Gesamtenergieverbrauch auf der Erde jährlich um circa 2,5% zunimmt

In Zeiten der Globalisierung, wo auch Schwellenländer wie China und Indien die Annehmlichkeiten der Mobilität für sich entdecken wird sich die Energiebilanz der Schwellenländer bald jenem Niveau der Industrienationen angleichen. Weiters steigt sowohl in den Industrieländern als auch in den Schwellenländern die Kilometerleistung ständig an, der Bewegungsradius wird dem Leben in der Globalisierung angepasst. Dem zusätzlichen Verbrauch etwas entgegen wirkt die Wirkungsgradanhebung durch verbesserte Technolo-

<sup>14</sup> Vgl. [bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview) (abgerufen am 01.04.2010)

<sup>15</sup> Vgl. BP Statistical Review of World Energy June 2009, S.:13

gien, des reicht allerdings bei Weitem nicht den steigenden Energiebedarf einzudämmen.<sup>16, 17, 18</sup>

### 2.2 Begrenztheit der Ressourcen

Wie lange fossile Energieträger dem Menschen wirklich zur Verfügung stehen kann zurzeit niemand genau sagen. Die vorhandenen Reserven werden in verschiedenen Kategorien eingeteilt:

- *Proved reserves*: Beschreiben die Menge an Erdöl, die mit heutigen Mitteln mit einer Wahrscheinlichkeit von zumindest 90 % gefördert werden kann.
- *Probable reserves*: Beschreiben die Menge an Erdöl, die mit heutigen Mitteln mit einer Wahrscheinlichkeit von zumindest 50 % gefördert werden kann.
- *Possible reserves*: Beschreiben die Menge an Erdöl, die mit heutigen Mitteln mit einer Wahrscheinlichkeit von zumindest 10 % gefördert werden kann.

Die Bezifferung der zeitlichen Verfügbarkeit ist ein sich ständig fortsetzender Kampf verschiedener Interessensgruppen. Mit Sicherheit sagen kann man nur, dass die Vorkommen von Erdöl, Erdgas, Braunkohle und Steinkohle endlich sind. Die folgende Grafik zeigt die derzeit bekannten Reserven an Erdöl auf der Erde. Die Angabe erfolgt in Tausend Millionen Barrel.<sup>19</sup> Die Grafik zeigt, dass die meisten Vorkommen im Mittleren Osten beheimatet sind.<sup>20</sup>

---

<sup>16</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 6ff

<sup>17</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:23ff

<sup>18</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:14ff

<sup>19</sup> Ein Barrel ist die international gängige Maßeinheit für Erdöl. Ein Erdöl-Barrel entspricht 159 Liter.

<sup>20</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG6



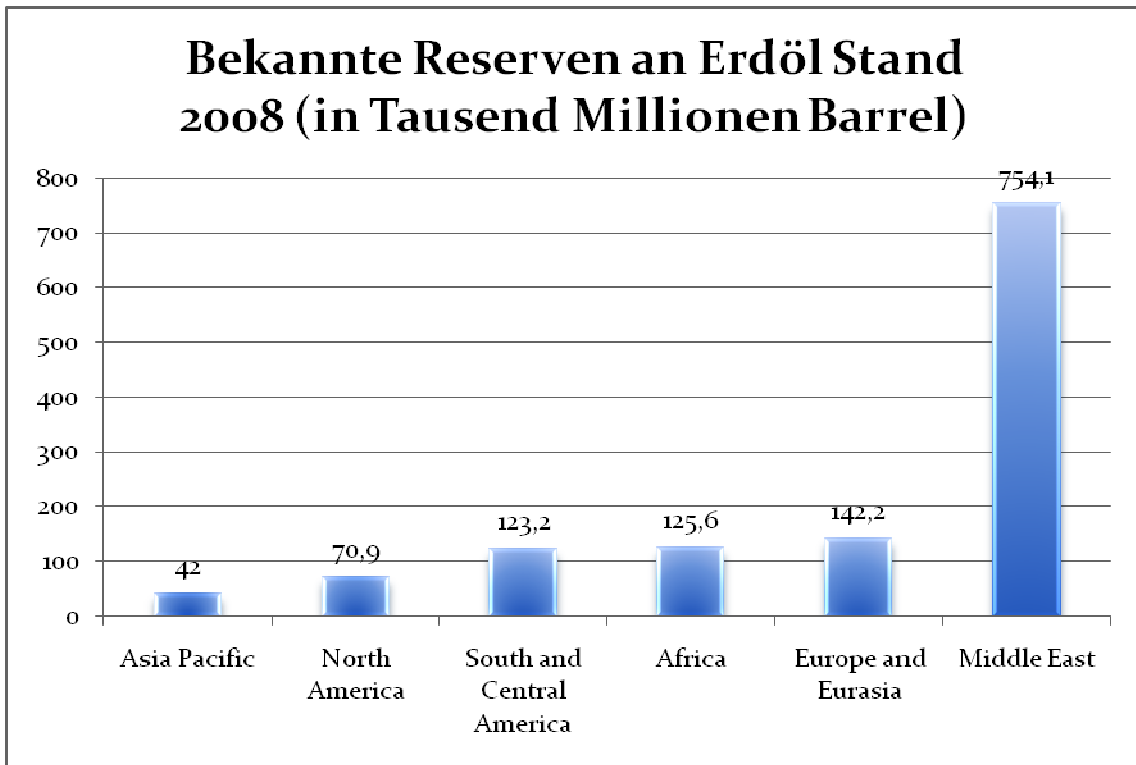


Abb. 4: Derzeit bekannte Reserven an Erdöl 2008<sup>21</sup>

Eine Abschätzung der Verfügbarkeit von derzeit bekannten Ressourcen für fossile Energieträger zeigt folgende Grafik.

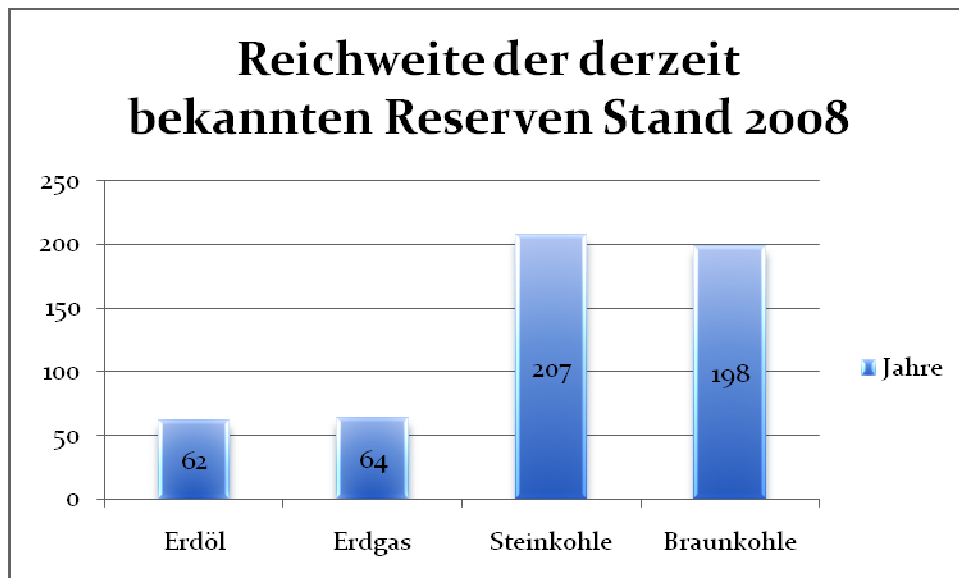


Abb. 5: Reichweite der derzeit bekannten Reserven<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Vgl. BP Statistical Review of World Energy June 2009, S.:7, eigene Darstellung

<sup>22</sup> Quelle: Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 5

Ein Indiz für die Verknappung des Rohstoffes Erdöl sind auch die Preisentwicklungen für Benzin und Diesel. Deren Preisentwicklungen scheinen allerdings nicht immer durch Angebot und Nachfrage an sich zu schwanken, sondern die Preise für Treibstoff scheinen vielmehr ein Spielball der internationalen Politik zu sein. Die großen Preisschwankungen wurden zumeist durch kriegerische Konflikte herbeigeführt. Nur kleinere Preisschwankungen kann man auf Neufunde zurückführen. Wie sehr sich eine reale Verknappung auf den Ölpreis auswirkt lässt sich heute nur sehr schwer vorhersagen. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung des Ölpreises von 1861 bis 2008.

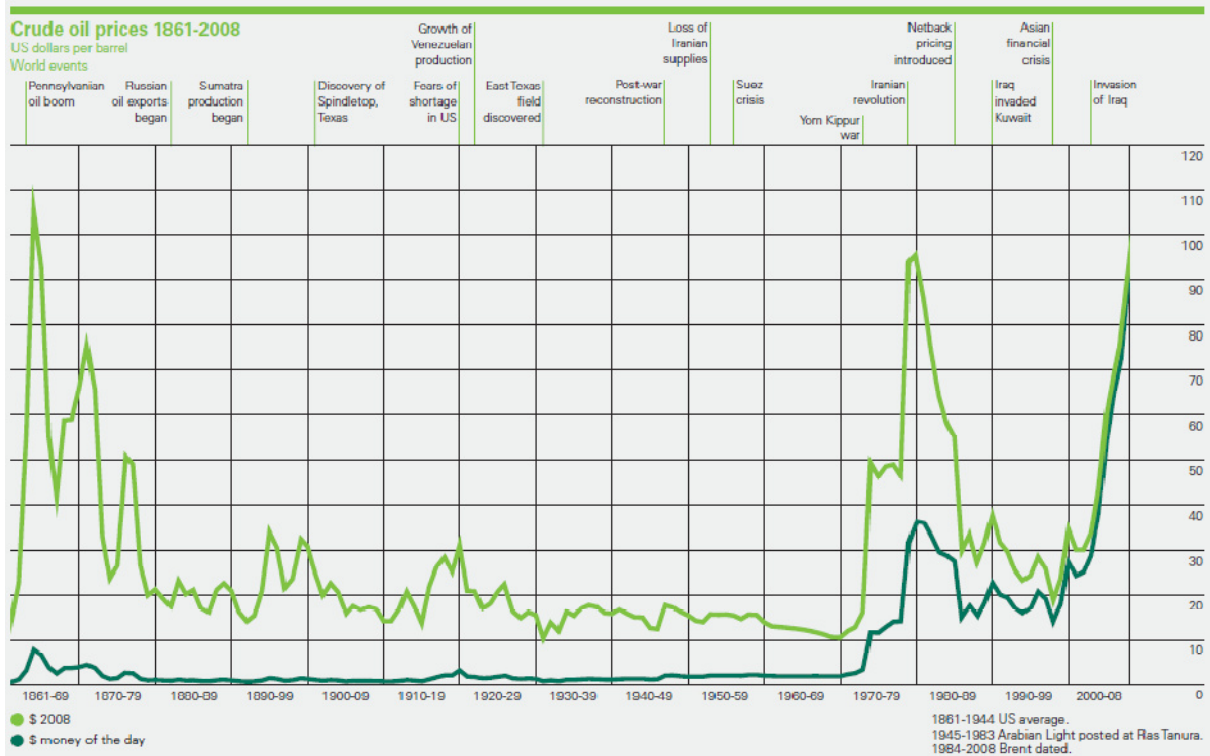


Abb. 6: Entwicklung des Rohölpreises von 1861 bis 2008<sup>23</sup>

Die Entwicklung des Ölpreises hängt darüber hinaus von einer Vielzahl von Faktoren ab, die hier nicht alle ausreichend geklärt werden können. Folgende Grafik schafft einen kurzen Überblick über die wesentlichen Bestimmungsfaktoren des Ölpreises. Diese Bestimmungsfaktoren führen in einem späteren Kapitel, den Ölpreis-Szenarien, eine wichtige Rolle.

<sup>23</sup> Vgl. BP Statistical Review of World Energy June 2009, S.:16

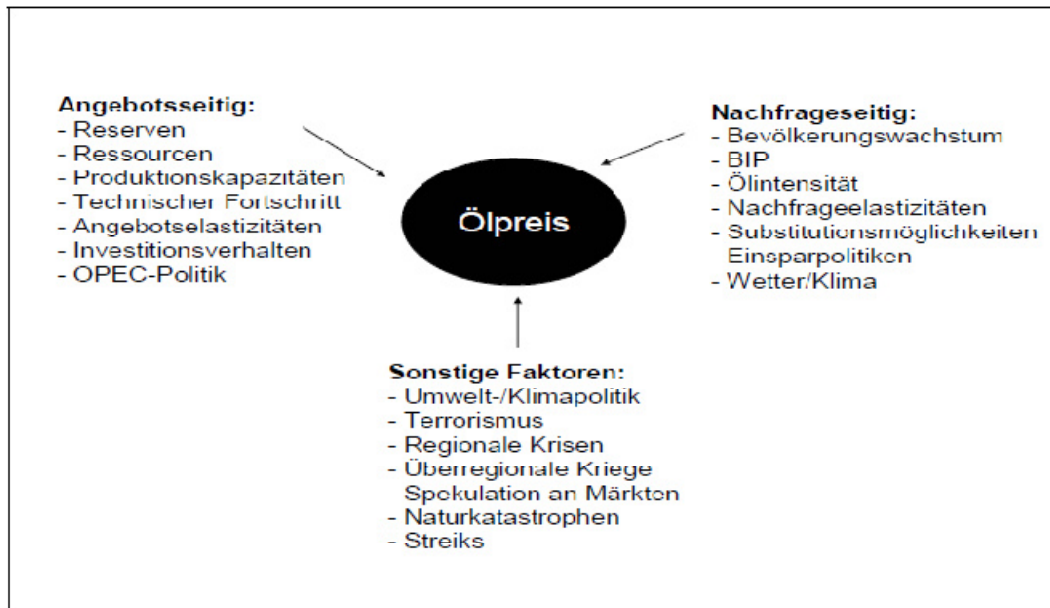


Abb. 7: Wesentliche Bestimmungsfaktoren des Ölpreises<sup>24</sup>

Generell ist allerdings davon auszugehen, dass der Ölpreis bis 2030 weiterhin steigt. Gründe dafür sind die ständig steigende Nachfrage auf Grund der steigenden Motorisierung in weiten Teilen der Welt. Ein weiterer preissteigernder Faktor ist die politisch instabile Lage im Nahen Osten in dem circa zwei Drittel des noch vorhandenen Erdöls vermutet werden. Ein weiterer Faktor ist die zunehmende Förderung in weniger ergiebigen Gebieten auf Grund der steigenden Nachfrage, dies lässt die Produktionskosten steigen. Politische Entscheidungen, etwa Steuererhöhungen auf fossile Energieträger zur Attraktivierung von Alternativenergien oder zur direkten Anlastung externer Kosten im Verkehr, werden sich ebenfalls auf die Treibstoffpreise auswirken. Wie lange es uns noch möglich sein wird fossile Energieträger zu fördern und zu benutzen ist aus heutiger Sicht noch unklar. Verschiedene Prognosen von verschiedenen Interessensgruppen sprechen von einer Zeitspanne zwischen 25 und 200 Jahren.<sup>25, 26</sup>

### 2.3 Umweltbelastung

Mit dem Wort Umweltbelastung sind in diesem Zusammenhang nicht nur die negativen Auswirkungen auf den Menschen gemeint, sondern vielmehr auch auf die Tier- und Pflan-

<sup>24</sup> Vgl. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln. (2006). Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage. S.:32

<sup>25</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 12ff

<sup>26</sup> Vgl. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln. (2006). Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage. S.:29ff

zenwelt, auf die Luft die wir atmen und auf den Boden auf dem wir stehen. Alle Einflüsse, die diese Umwelt negativ beeinflussen, können als Umweltbelastung bezeichnet werden. Bei der unvollständigen Verbrennung von fossilen Energieträgern, die in gängigen Otto- und Dieselmotoren der Fall ist, werden Schadstoffe freigesetzt, weil sich bei diesem thermodynamischen Prozess deren chemische Struktur ändert. Bei jedem Verbrennungsprozess in einem Personenkraftwagen entstehen gewisse Mengen an Schadstoffen. Eine mögliche Gliederung der Schadstoffe ist die Unterteilung in nichtlimitierte und limitierte Emissionen. Bei limitierten Emissionen handelt es sich um Schadstoffe deren Ausstoß vom Gesetzgeber reglementiert wird.<sup>27</sup>

### 2.3.1 Gesetzlich limitierte Emissionen

Kohlenwasserstoffe ( $C_nH_m$ ): Bezeichnung aller Verbindungen die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Kohlenwasserstoffe im Abgas sind ein eindeutiges Zeichen für unvollständige Verbrennung im Motorraum. Aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen werden kanzerogene Eigenschaften zugeschrieben.

Kohlenmonoxid (CO): CO ist ein geruchloses, farbloses und reizloses Gas. Dieses, bei unvollständiger Verbrennung entstehende, Gas wirkt gesundheitsgefährdend, da es die Sauerstoffaufnahme des Blutes behindert.

Stickoxide ( $NO_x$ ): Diese Gruppe an Emissionen umfasst Stickoxid (NO) und Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ). Diese Verbindungen entstehen besonders bei sehr hohen Verbrennungstemperaturen. Stickoxid greift die Schleimhäute der Lungen an und begünstigt so Atemwegserkrankungen. In der Luft reagieren die Oxide mit Wasser zu Salpetersäure ( $HNO_3$ ) und sind so mitverantwortlich für den sauren Regen. Des Weiteren tragen die Stickoxide zur Smogbildung bei.

Ruß (C): Ruß, ist reiner, unverbrannter Kohlenstoff, wird vornehmlich in Dieselaggregaten erzeugt. In der Atmosphäre können die Kohlenstoffe mit anderen Elementen reagieren und so eine kanzerogene Wirkung erlangen. Des Weiteren sind Dieselruß-Partikel Teil der Feinstaubproblematik.<sup>28</sup>

---

<sup>27</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:37ff

<sup>28</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:40ff

### 2.3.2 Nichtlimitierte Emissionen

Bei nichtlimitierten Emissionen unterliegt die Menge des Ausstoßes keiner Begrenzung durch den Gesetzgeber.

Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>): Ist ein farbloses, aber stechend riechendes Gas das bei der unvollständigen Verbrennung von schwefelhaltigen Energieträgern entsteht. Reaktionsprodukte von Schwefeldioxid führen zu saurem Regen und Smogbildung.

Benzol, Toluol, Xylol (BTX): BTX sind Benzinbestandteile die bei unvollständiger Verbrennung zurückbleiben können. Die Stoffe sind leicht flüchtig. Benzol gilt als krebserregend, Toluol führt bei erhöhter Konzentration zu Schleimhautreizungen, Störungen des Nervensystems und zu Schädigungen von Leber, Nieren und Gehirnzellen.

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>): Beim CO<sub>2</sub> besteht unter den Experten Uneinigkeit ob es sich um einen Schadstoff, um ein Treibhausgas oder um ein natürliches Umweltgas handelt. CO<sub>2</sub> ist natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre und wird von Pflanzen und auch Tieren zum Leben benötigt. Durch die von der Menschheit produzierten Mengen an CO<sub>2</sub> nimmt der Treibhauseffekt immer weiter zu, die Durchschnittstemperatur der Erde kann, bedingt durch diesen Effekt, in den nächsten 50 Jahren um 1,5 bis 4,5 °C ansteigen, darüber stimmen über 90% der Wissenschaftler überein. Der Treibhauseffekt entsteht durch die Verhinderung der Rückstrahlung von langwelliger Infrarotstrahlung. Bestimmte Substanzen, darunter auch CO<sub>2</sub>, verhindern diese Rückstrahlung und tragen so, ähnlich einem Glashaus, zur Erwärmung der Erde bei. Der natürliche Treibhauseffekt ist essentiell für das Leben auf der Erde, wird durch die zusätzlichen Emissionen der Menschheit allerdings in unnatürlichem Maße verstärkt.<sup>29</sup>

### 2.3.3 Kyoto – Protokoll

Nach unverbindlichen Bemühungen zur Reduktion von Treibhausgasen beim Klimagipfel in Rio de Janeiro 1992 einigten sich insgesamt 160 Staaten 1997 in der japanischen Stadt Kyoto auf verbindliche Ziele zur Verringerung der Treibhausgase. Das sogenannte ‚Kyoto-Protokoll‘ trat 2005 in Kraft und ist bis 2012 befristet. Die Industrienationen verpflichteten sich den Ausstoß an Kohlendioxid und Treibhausgasen um 5,2% gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 zu senken. Die vereinbarten Maßnahmen sollten als Anreiz zur Reduktion dienen:

- Joint Implementation (Anrechnung von Emissionsreduktionen bei Projekten zwischen Industrienationen)

---

<sup>29</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:42ff

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Clean Development Mechanism (Anrechnung von Emissionsreduktionen bei Projekten zwischen Industrienationen und Entwicklungsländern)
- Emissions trading (Internationaler Handel mit Emissionsrechten)

Die globale Wirkung und Reichweite des Protokolls wird allerdings von zahlreichen Experten bezweifelt. Dies liegt daran, dass Nationen wie die USA und Australien das Protokoll bis heute nicht ratifiziert haben und dass für Schwellenländer wie China, Brasilien und Indien keine Beschränkungen festgelegt wurden. Auch zahlreiche Industrienationen die das Protokoll ratifiziert haben werden die gesteckten Ziele nicht erreichen. Folgende Grafik zeigt die Entwicklung in den Ländern der EU-15.

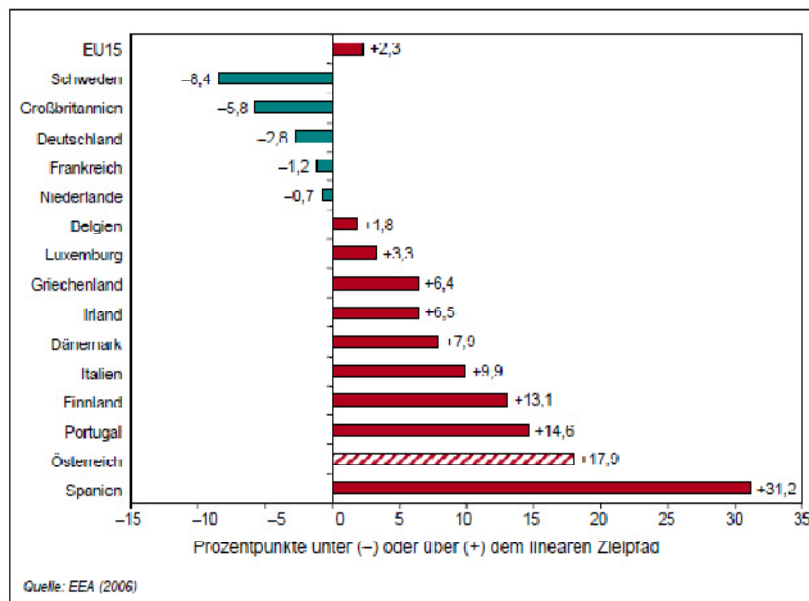


Abb. 8: Abweichung der EU-15 Staaten vom Kyoto-Zielpfad 2004<sup>30</sup>

Wie die Grafik zeigt wird auch Österreich die sogenannten „Kyoto-Ziele“ nicht erreichen. Schuld daran ist unter Anderem auch der Verkehrssektor, der in Österreich für 26,2% der Treibhausgase verantwortlich ist. Der Verkehrssektor in dieser Untersuchung umfasst die Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas aus Straßen-, Schienen-, Wasser- und Luftverkehr sowie aus Pipelines und Militärfahrzeugen und verzeichnet einen stetigen Anstieg. Im Zeitraum von 1990 bis 2005 sind die Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr um 91,6 % angestiegen, von 2004 bis 2005 zwar nur um 3,1 %, eine Verringerung der Emissionen, wie eigentlich angestrebt, wurde aber nicht erreicht.

<sup>30</sup> Vgl. Umweltbundesamt: Kyoto – Fortschrittsbericht Österreich 1990-2005 (Datenstand 2007), S.:17

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

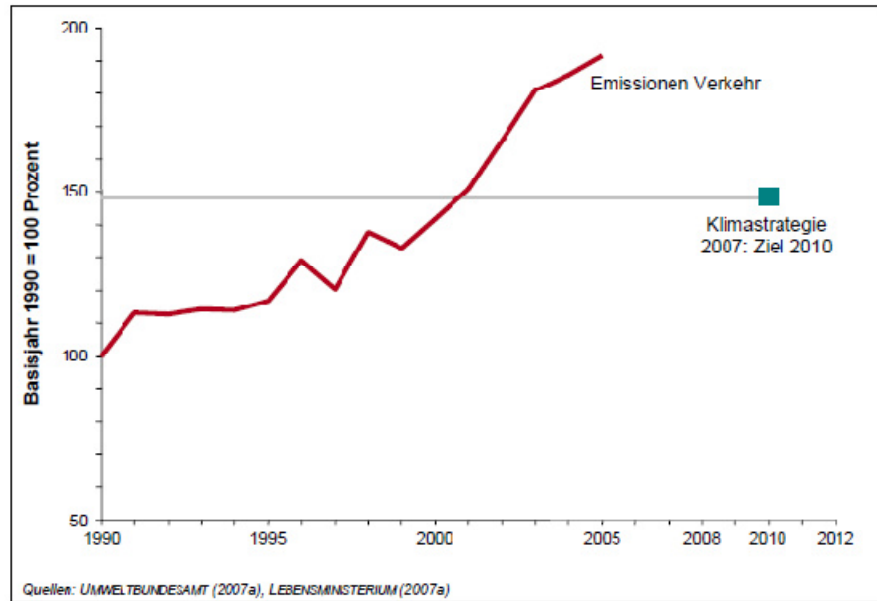


Abb. 9: Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr in Österreich von 1990 bis 2005<sup>31</sup>

Hauptverursacher im Verkehrssektor in Österreich ist der Straßenverkehr. Kohlendioxidemissionen aus dem Straßenverkehr machen 94 % der Emissionen des gesamten Verkehrssektors aus. Knapp 56 % der Kohlendioxidemissionen aus der in Österreich getankten Kraftstoffmenge sind dem Personenkraftwagen-Verkehr zuzuordnen, wie die folgende Grafik zeigt. Hier liegt der Anstieg zwischen 1990 und 2005 bei 46 %.

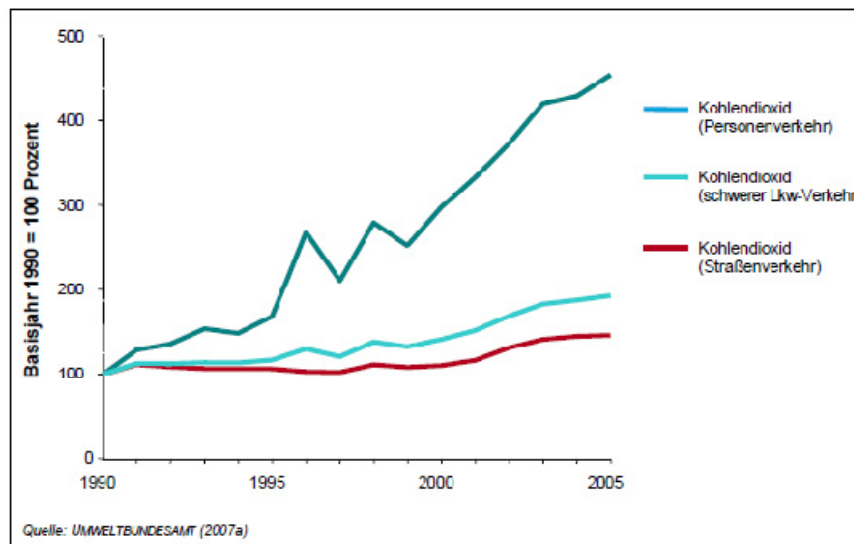


Abb. 10: Kohlendioxid aus dem Straßenverkehr auf Basis des in Österreich getankten Kraftstoffes von 1990 bis 2005<sup>32</sup>

<sup>31</sup> Vgl. Umweltbundesamt: Kyoto – Fortschrittsbericht Österreich 1990-2005 (Datenstand 2007), S.:32

<sup>32</sup> Vgl. Umweltbundesamt: Kyoto – Fortschrittsbericht Österreich 1990-2005 (Datenstand 2007), S.:33

## 2.4 Bestehende Mobilitätsmuster

Die bestehenden Mobilitätsmuster anhand deren die Fähigkeiten und Anforderungen von Personenkraftwagen mit alternativen Antriebsformen untersucht werden sollen werden in diesem Kapitel kurz beschrieben. Natürlich sehen die Mobilitätsmuster in jedem Land geringfügig anders aus. Dies liegt an den unterschiedlichen Siedlungsstrukturen, an der Topografie des Landes und an den Arbeitsplatzverhältnissen. Aus Gründen der besseren Verständlichkeit und der verfügbaren Datengrundlagen wird als Basisland für diese Untersuchung Österreich, stellvertretend für alle anderen Länder, ausgewählt. Da für diese Untersuchung nur die Höchstwerte relevant sind um zu zeigen welche Anforderungen an neue Antriebe gestellt werden wird in diesem Kapitel nicht zwischen Distanzen und Zeitdauern bei Männern und Frauen unterschieden.

Eine durchschnittliche österreichische Person legt am Tag durchschnittlich circa 4 Wege zurück. Die durchschnittliche Wegelänge im MIV betrug im Jahr 1995 13,7 km. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Zahl leicht erhöht hat. Die durchschnittliche Wegedauer im MIV in Österreich im Jahr 1995 betrug 23 Minuten. Auch diese Zahl dürfte sich leicht erhöht haben. Die folgende Grafik zeigt, dass beim Modal Split vor allem Personen zwischen 26 und 55 Jahren einen MIV-Lenker Anteil von über 50% aufweisen. Wege zu Geschäftszwecke werden zu 73,1% mit einem Personenkraftwagen zurückgelegt.

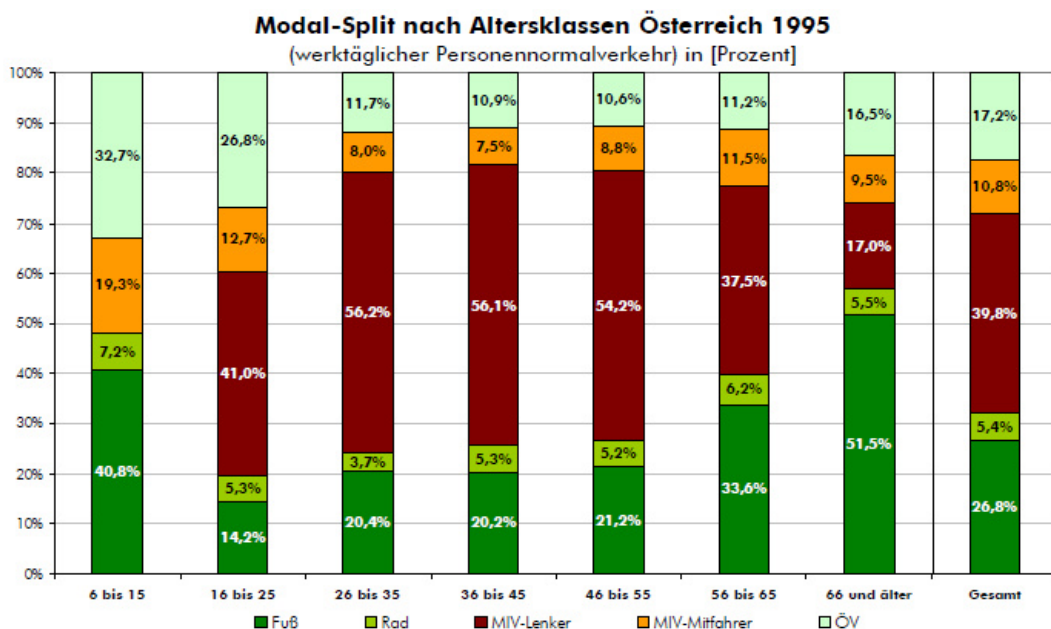


Abb. 11: Modal Split nach Altersklassen in Österreich 1995<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:99



Die Personengruppe mit der höchsten durchschnittlichen Tageswegedauer in Minuten in Österreich ist die Gruppe der voll berufstätigen Personen. Deren durchschnittliche Tageswegedauer liegt an einem Werktag bei 83 Minuten. Diese Zahlen stammen allerdings bereits aus dem Jahr 1995. Es ist davon auszugehen, dass die Tageswegedauer seither angestiegen ist. So zum Beispiel beträgt die durchschnittliche Tageswegedauer im werktäglichen Personennormalverkehr in Niederösterreich im Jahr 2003 bereits 87 Minuten.

Vor allem der Zeitaufwand bei Berufstagespendler kann sehr hoch sein. In den Bundesländern Niederösterreich und Burgenland, von denen aus viele nach Wien pendeln beträgt der Anteil der Pendler die länger als eine Stunde unterwegs sind um die 10%.<sup>34</sup>

Die durchschnittliche Tageswegelänge im werktäglichen Personennormalverkehr beträgt in Niederösterreich im Jahr 2003 50,3 Kilometer. Es ist davon auszugehen das sich diese Zahl ebenfalls leicht erhöht hat. Auch bei der durchschnittlichen Tageswegelänge weisen die voll Berufstätigen die höchsten Werte auf.<sup>35</sup>

Für den Wochenend- und Urlaubsverkehr sind leider keine Weglängen vorhanden, diese an Wochenenden zurückgelegten Distanzen wären allerdings sehr interessant. 75% der Geschäftsreisen im Inland und 82% der Inlandsurlaube werden mit dem PKW getätigt.<sup>36</sup>

Aus den bestehenden Mobilitätsmustern in Österreich ergeben sich Anforderungen an alternative Antriebe um auf dem Markt als Konkurrenz zu Otto- und Dieselmotoren bestehen zu können.

Bei einer durchschnittlichen Tageswegelänge von 50, 3 Kilometern ist eine Reichweite mit einer Tankfüllung oder Akkuladung von mindestens 250 Kilometern wünschenswert um nicht während der Woche nachtanken oder aufladen zu müssen. Bei Urlaubs- oder Geschäftsreisen, die für gewöhnlich über längere Strecken getätigt werden ist eine höhere Reichweite wünschenswert. Diese kann allerdings nicht abgeschätzt werden, da in Österreich durchschnittliche Reisedistanzen auf diesem Gebiet nicht erhoben werden.

Basierend auf den Reichweiten muss auch eine flächendeckende Versorgungsinfrastruktur mit Tankstellen und Aufladestationen vorhanden sein. So sind zum Beispiel in Österreich zurzeit 168 Erdgas Tankstellen in Betrieb, viel zu wenig um flächendeckend operieren zu können.<sup>37</sup> Es gibt in Österreich noch keine einzige frei zugängliche Wasserstofftankstelle. Der Gasproduzent Linde rüstet bereits jetzt alle Autohersteller die mit Wasserstoff produzieren mit marktreifen Tankstellen aus. Die Technik, vor allem in puncto Sicherheit ist also schon heute gegeben.<sup>38</sup>

<sup>34</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:33

<sup>35</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:85-108

<sup>36</sup> Vgl. Statistik Austria: Urlaubs- und Geschäftsreisen Kalenderjahr 2007 S.:8ff

<sup>37</sup> Vgl. <http://www.erdgasautos.at/tanken/571> (abgerufen am 20.04.2010)

<sup>38</sup> Vgl. [http://www.linde-gas.at/wasserstoff/wasserstoff\\_tankstellen.html](http://www.linde-gas.at/wasserstoff/wasserstoff_tankstellen.html) (abgerufen am 26.04.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

In Österreich gibt es zurzeit 63 reguläre Tankstellen bei denen man Biodiesel beziehen kann. Dieses Netz hat sich in den letzten Jahren sehr stark ausgebreitet, ist aber noch zu dünn um flächendeckend zu sein. So zum Beispiel gibt es in Kärnten zurzeit nur eine Tankstelle die Biodiesel führt.<sup>39</sup>

Zurzeit gibt es in Österreich 14 Tankstellen bei denen man Ethanol beziehen kann. In Vorarlberg, Tirol und Kärnten befindet sich leider noch keine einzige Tankstelle.<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. <http://www.wkw.at/docextern/tankstellen/TankstellenService/Biodieseltankstellen.htm> (abgerufen am 26.04.2010)

<sup>40</sup> <http://www.fuelcat.de/tankstellenin-europa/tankstellen-in-oesterreich.html> (abgerufen am 26.04.2010)

### 3 Geschichte der Personenkraftwagen

Dieses Kapitel verschafft in chronologischer Reihenfolge einen kurzen Überblick über die bisherigen Meilensteine der Automobilentwicklung, die die weitere Entwicklung und den technischen Fortschritt geprägt haben. Dieses Kapitel bezieht sich nur auf Automobile (Zusammensetzung aus autos, griechisch, „selbst“ und mobilis, lateinisch, „beweglich“) und nicht auf durch Tiere oder Menschenkraft bewegte Wagen. Nach Erfindung des Rades dauerte es Jahrtausende ehe man einen geeigneten Antrieb fand. Windkraftwagen und Muskelkraftwagen waren der klassischen Pferdekutsche in keinem Punkt überlegen. So hing die Entwicklung von einem sich selbst bewegenden Personenkraftwagen von der Entwicklung einer geeigneten Antriebsquelle ab. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der besseren Perzeptivität wird dieses Kapitel anhand einer Zeittafel abgehandelt.

1674

Der niederländische Physiker Christian Huygens (1629-1695) konstruierte eine Kolbenmaschine mit Pulverantrieb. Er gilt als Pionier des Verbrennungsmotors und Erfinder des Kolbenmotors. Es handelte sich um einen Explosionsmotor, bei dem Schießpulver als Brennstoff eingesetzt wurde. Die damaligen Werkstoffe waren den enormen Belastungen allerdings noch nicht gewachsen, seine Idee wurde erst nach dem Abebben der Dampfmaschine wieder aufgegriffen.

1712

Der englische Erfinder Thomas Newcomen (1663-1729) konstruierte die erste wirtschaftlich und technisch brauchbare Dampfmaschine. Er legte damit den Grundstein für die wesentlichste Technologie der Automobilentwicklung in den nächsten 100 Jahren. Die Dampfmaschine sollte einen Siegeszug auf der Schiene, auf der Straße und am Wasser zurücklegen.

1764

Der schottische Erfinder James Watt (1736-1819) verbesserte die Dampfmaschine Newcomen's und gilt als Erfinder der direkt wirkenden Dampfmaschine. Watts Verbesserungen ermöglichten gegenüber der von Thomas Newcomen entwickelten Dampfmaschine eine Ersparnis an Steinkohle von über 50 Prozent. Die Leistung von Watts Dampfmaschine betrug in etwa 20 PS. Watts Dampfmaschine war der direkte Auslöser für die rasch einsetzende Industrialisierung, für die Industrielle Revolution schlechthin.

1769

Der Franzose Nicholas Cugnot (1725-1804) konstruierte das erste Automobil für vier Passagiere, den „Fardier“. Dieser hatte 3 Räder, einen über der Vorderachse angebrachten Dampfkessel und 2 Zylinder die über ein Freilaufgetriebe und einen Sperrklinkenantrieb das Automobil antrieben. Der Fardier wurde zum Munitionstransport für das französische Militär konzipiert. Bedingt durch das Fehlen von Bremsen, sein hohes Gewicht und die damit einhergehende verminderte Lenkbarkeit verhinderten jedoch einen Erfolg im Alltag.

*30. Januar 1807*

Der Schweizer Isaac de Rivaz (1752-1828) entwickelte die Idee von Huygens weiter und gilt als Erfinder des ersten, zumindest für kurze Zeit funktionierenden, Explosionsmotors. Sein Zweitaktmotor verwendete ein zündfähiges Gemisch aus Steinkohlengas, Wasserstoff und Luft. Dieses Gemisch wurde durch einen Funken in den beiden Zylindern elektrisch gezündet und trieb durch die Verbrennung jeweils einen Kolben in die Höhe. Dieser war oberhalb einer Zahnstange befestigt, die beim Herabfallen des Kolbens in ein Zahnrad griff und dann über einen Seilzug ein Räderpaar antrieb. Bei einem ersten Fahrversuch im Jahr 1813 schaffte er mit 25 Zündungen eine Wegstrecke von circa 26 Metern.

*23. Januar 1860*

Der Luxemburger Etienne Lenoir (1822-1900) entwickelte den ersten brauchbaren Gasmotor. 1863 konstruierte er das erste damit angetriebene Straßenfahrzeug, das „Hippomobile“. Mit diesem Automobil legte er, laut eigenen Angaben, eine 9 km lange Strecke in etwa 3 Stunden zurück. Von seinem Gasmotor wurden über 400 Exemplare gefertigt. Der Motor arbeitete nach dem verdichtungslosen Zweitaktprinzip, wie bereits bei einigen vorher erwähnten Modellen, der Antrieb wirkte direkt auf die Kurbelwelle. Die Maschine Lenoirs war allerdings auf Grund des hohen Schmieröl- und Gasverbrauchs. Der Größe der Maschine an sich und des mitzuführenden Gasvorrats nicht als Straßenfahrzeug für die breite Masse geeignet. Es wurden nur circa 300 bis 400 Stück produziert.

Die Technik war zu dieser Zeit allerdings noch nicht ausgereift genug um in großem Maße den Pferdewagen und der Eisenbahn Konkurrenz zu sein. Unfälle durch brechende und explodierende Bauteile waren normal, die Vibrationen auf den kleinen Wagen waren enorm, der scharfe Geruch des verbrannten Öls und der umherfliegende Ruß belästigten die Passagiere. Des Weiteren waren die Kosten enorm. Wo eine Strecke für eine Pferdekutsche 4 Schillinge kostete beliefen sich die Kosten für einen Dampfwagen auf derselben Strecke auf 48 Schillinge. Dies ließ die Passagiere zu den Pferdewagen zurückkehren. Auch gesetzliche Änderungen erschwerten die Etablierung auf dem Markt. 1865 erließ das Parlament in London das ‚Red Flag Act‘. Es schrieb Höchstgeschwindigkeiten, Ge-

wichtsgrenzen und Maximalgrößen vor. Des Weiteren musste vor jedem Dampfwagen eine Person mit roter Flagge gehen um Mensch und Tier davor zu warnen. Dieses Gesetz brachte bis zu seiner Aufhebung 1896 die Entwicklung auf diesem Gebiet in England beinahe komplett zum Erliegen. Von da an übernahmen die Franzosen und die Deutschen die führende Rolle bei der Entwicklung von Personenkraftwagen.

*1876*

Der Deutsche Kaufmann Nikolaus August Otto (1832-1891) ließ sich den, später nach ihm benannten „Ottomotor“, einen Viertaktmotor, patentieren. Dieser Motor basierte auf dem von Lenoir 1860 gefertigten Modell und wurde von Otto immer weiter verbessert. Revolutionär daran war das Viertakt-Prinzip, welches für die damalige Zeit bereits sehr starke Motoren ermöglichte. Das 1876 gefertigte Modell wurde mit Leuchtgas betrieben und hatte circa eine Leistung von 3 PS bei 180 Umdrehungen pro Minute. Diese Motoren wurden ab 1877 in Serie gefertigt. Obwohl es bereits frühere Patente gab war es doch der Ottomotor, der den Siegeszug der Verbrennungsmotoren gegenüber den Dampfmaschinen einläutete.

*1882*

Die Deutschen Gottlieb Daimler und Wilhelm Maybach richteten eine Versuchswerkstatt in Cannstatt ein. Dort arbeiteten sie an technischen Verbesserungen der Otto-Maschine, an Zündvorgängen und an Gewichts- und Größenreduktionen. Sie entwickelten den Vergaser-Motor. Des Weiteren entwickelten sie einen Motor mit, für damalige Zeiten revolutionären, 600U/Min. Die Erhöhung der Drehzahl war Grundbedingung für die Verkleinerung der Wagen. Auch der Deutsche Karl Benz entwickelte Zündung und Motorfunktionsweise weiter und schuf 1886 mit seinem ‚Patent - Motorwagen‘ das erste serienreife Automobil mit Verbrennungsmotor.

*27. Februar 1892*

Der deutsche Ingenieur und Erfinder Rudolf Diesel (1858-1913) entwickelt den Dieselmotor und lässt ihn sich patentieren. 1897 entwickelt er den ersten alltagstauglichen Dieselmotor für Automobile. Der Dieselmotor wird bis heute sukzessive weiterentwickelt und wird mittlerweile bei mehr als 50% aller neugefertigten Personenkraftwagen in Österreich eingebaut.<sup>41</sup>

*1895*

---

<sup>41</sup> Vgl. Herry, M. (2007). Verkehr in Zahlen. Wien: Bmvit. S.:74ff

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Die Erfindung von Luftreifen durch die Franzosen Andre und Edouard Michelin ermöglichte höhere Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Motorleistung. Des Weiteren federten sie die damals überall vorhandenen Unebenheiten auf den Straßen besser ab und ermöglichten den Autoherstellern eine leichtere Bauweise. Ohne Luftreifen wäre der überraschende Fortschritt in den ersten Jahren des Automobils nicht möglich gewesen.

Die bestehende Technik wurde in den nächsten Jahren immer weiter verbessert. Das Automobil spielte vor 1900 weder wirtschaftlich noch gesellschaftlich eine tragende Rolle. Zu hoch waren die Anschaffungskosten, zu groß waren die Vorurteile und das Misstrauen der Bevölkerung. Die folgende Tabelle zeigt die Verkaufszahlen führender deutscher Automobilbauer von den Jahren 1894 bis 1903.

	Benz	Daimler	Peugeot	Opel	Fiat
1894	67	1	40	-	-
1895	135	8	72	-	-
1896	181	24	92	-	-
1897	256	26	54	-	-
1898	434	57	156	-	-
1899	572	108	323	11	8
1900	603	96	500	24	24
1901	385	144	456	30	73
1902	226	197	637	64	107
1903	173	232	773	178	134

Tabelle 1: Produktionszahlen deutscher Automobilhersteller von 1894 bis 1903<sup>42</sup>

Zum Vergleich folgen in der nachstehenden Tabelle die Produktionszahlen der 10 weltweit größten Automobilhersteller aus dem Jahr 2008.

Automobilproduktion nach Unternehmen 2008	
Toyota (Japan)	9.237.780
General Motors (USA)	8.282.803
Volkswagen AG (Deutschland)	6.437.414
Ford Motor Company (USA)	5.407.000
Honda (Japan)	3.912.700
Nissan (Japan)	3.395.065

<sup>42</sup> Vgl. Eckermann, E. (2002). Vom Dampfwagen zum Auto. Bielefeld: Delius Klasing Verlag. S.: 58

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

PSA Peugeot Citroën (Frankreich)	3.325.407
Hyundai (Südkorea)	2.777.137
Suzuki (Japan)	2.623.567
Fiat (Italien)	2.524.325

Tabelle 2: Automobilproduktion nach Unternehmen 2008<sup>43</sup>

Größeres Vertrauen setzte man zu dieser Zeit in motorisierte Fahrräder die noch dazu viel billiger waren.

*29.04.1899*

Der Franzose Camille Jenatzy durchbrach als erster mit einem Straßenfahrzeug die 100km/h-Marke.

*1900*

Der vom Amerikaner Ransom Eli Olds ab 1900 gefertigte ‚Curved Dash‘ gilt mit einer Stückzahl von 11.275 verkauften Exemplaren als der erste erfolgreich in Großserie gefertigte Wagen der Welt. Zugleich bedeutete der Curved Dash den Durchbruch des Benzinmotors gegenüber den anderen Antriebstypen dieser Zeit. Der Automarkt in den USA war ungleich größer als in Europa, was zur Folge hatte, dass hier auch entscheidende Produktionsmethoden, wie etwa die Fließbandfertigung, eingeführt wurden.

*1913*

Der Amerikaner Henry Ford (1863-1947) perfektionierte die bereits lange bekannte Technik der Fließbandproduktion und konnte so erstmals die Nachfrage am Automobilmarkt mit seinem Ford „Modell T“ decken. Mit größtenteils eigens für einen Produktionsschritt angelernten Kräften konnten so die Wagen günstiger und schneller hergestellt werden. Die Montagezeit eines Autochassis verringerte sich von über 12 auf in etwa nur noch 2,6 Stunden. Im Jahre 1918 waren circa 50% aller Automobile in den USA ein „Modell T“. Der Ausstoß an Ford Modell T erhöhte sich von 208.667 Automobilen im Jahr 1913 auf 1.817.891 Automobile im Jahr 1923.

*Juni 1919*

Der französische Autohersteller Citroën beginnt, nach einer Werksbesichtigung in den USA bei Ford, mit der ersten Fließbandproduktion in Europa.

<sup>43</sup> Vgl. <http://oica.net/category/production-statistics/> (abgerufen am 21.05.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

In den 1920er, 1930er und 1940er Jahren wurde zumeist in die Weiterentwicklung und Verbesserung der Motoren hinsichtlich Leistungserhöhung und Zuverlässigkeit investiert. Auch die Optimierung von Fahrwerk und Karosserie waren Inhalt zahlreicher Automobilentwickler. Aus dieser Zeit resultieren heute noch angewendete Techniken wie Einzelradaufhängung, Automatikgetriebe, selbsttragende Karosserie und Schwingachsen. Diese und andere technische Neuerungen wurden binnen kürzester Zeit sowohl in Europa als auch in Amerika zum Standard bei Neuwagen.

*1921*

Zum ersten Mal wird ein Personenkraftwagen aerodynamischen Tests unterzogen. Der von der deutschen Wagenschmiede ‚Rumpler‘ hergestellte Wagen war des Weiteren mit Mittelmotor und Mittellenkung ausgestattet. Diese Ausstattungsmerkmale machten ihn zu einem visionären Fahrzeug seiner Zeit.

*1931*

Die deutschen Hersteller DKW und Stoewer entwickeln erstmals einen Kleinwagen mit Frontantrieb. Diese Technik wird sich erst später durchsetzen und zum Standard bei Personenkraftwagen werden.

*1934*

Der tschechische Autohersteller Tatra stellt mit dem „Tatra 77“ ein Modell vor, das in vielerlei Hinsicht die Entwicklung von Personenkraftwagen in Europa in den nächsten Jahren prägt. Als erster Hersteller legt Tatra Wert auf die Aerodynamik, der Tatra 77 weist einen  $c_w$ -Wert von 0,37 (geschätzt) auf. Mit seiner Stromlinienform und seiner technischen Auslegung mit Zentralrohrrahmen, luftgekühltem V8-Heckmotor, Fahrschemel und hinterer Pendelachse beschrieb er die technischen Standards für die nächsten Jahre.

*1951*

Die deutschen Automobilhersteller Gutbrod und Goliath entwickeln in Zusammenarbeit den ersten marktfähigen Motor mit Benzin-Direkteinspritzung. Diese Technik wird von Flugzeugherstellern übernommen und vermeidet Spülverluste, verringert den Verbrauch und Emissionen und erhöht die Leistung.

*1950er Jahre*

Nach den Wirren des Zweiten Weltkrieges und durch den wirtschaftlichen entstehen erstmals Massenautos, die es breiten Bevölkerungsschichten erlauben mit einem PKW mobil zu sein. Der VW Käfer, der Citroën 2CV und der Mini von BMC bestechen durch Spar-



samkeit, gute Fahreigenschaft, Detailgenauigkeit und ständige Optimierungen. Auch in den USA, deren Autohersteller nur riesige ‚Straßenkreuzer‘ produzierten, wurden Kleinstwagen wie der VW Käfer zu einem Erfolg und zwangen die heimischen Autohersteller zum Umdenken.

*1955*

Ähnlich dem Tatra 77 stellt die Baureihe „DS“ von Citroën einen technischen Meilenstein dar, der die technische Entwicklung auf dem europäischen Markt in den nächsten Jahren prägen sollte. Neben einem futuristischen Design waren langer Radstand, Vorderradantrieb, Scheibenbremsen, Servounterstützung und hydropneumatische Federung Merkmale der Modellreihe. Citroën verkaufte zwischen den Jahren 1955 bis 1975 beinahe 1,5 Millionen Modelle.

*1959*

Der ungarische Ingenieur Béla Barényi entwirft für den ‚Mercedes Benz 220‘ das Knautschpatent, nach dem auch alle heutigen Wagen gefertigt werden. Das Fahrzeug verfügte über eine steife Fahrgastzelle und nach den Enden abnehmender Sicherheit. Die Türen ließen sich auch noch nach einem Unfall zumeist noch öffnen.

*1964*

Der ‚Spider‘ vom deutschen Hersteller NSU verfügte über den ersten Wankelmotor in einem Serienwagen und über eine kontaktgesteuerte Hochspannungskondensatorzündung HKZ. Dieser Wagen leitete die elektronische Ära bei Personenkraftwagen ein.

*1968*

In den USA werden erstmals negative Begleiterscheinungen der Massenmotorisierung offensichtlich. Der Staat Kalifornien begrenzte 1968 die Schadstoffemission von Personenkraftwagen. Auch 1968 wird der erste PKW mit elektronischem ABS, wenn auch nur auf der Hinterachse, vorgestellt, ein Lincoln.

*1979*

Der japanische Automobilhersteller Subaru stellt den ‚4WD‘ vor, der erste Personenkraftwagen mit zuschaltbarem Allradantrieb. Man erhoffte sich davon bessere Traktion auf der Straße und im Gelände.

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

1990

Der deutsche Automobilhersteller Audi führt erstmals in einem Serienwagen die Diesel-Direkteinspritzung bei einem PKW ein.

1993

In der Europäischen Union werden erstmals Katalysator – Vorschriften eingeführt. Der deutsche Autohersteller Audi führt den ersten Aluminium Fachwerkrahmen ein.

1995

Weitere technische Fahrerassistenzsysteme wie ESP (Fahrdynamikregelung), ASR (Anti-Schlupf-Regelung) und der Parkassistent werden in immer mehr Personenkraftwagen eingebaut.

1997

Der japanische Automobilhersteller Toyota stellt mit dem ‚Prius‘ den ersten serienfähigen Benzin/Elektro - Hybridantrieb vor.

1999

VW stellt mit dem VW Lupo 3L das erste vollwertige 3 – Liter – Auto vor.

2000

Der französische Autohersteller Peugeot baut Ruß- und Partikelfilter in Diesel – PKW ein.<sup>44</sup>

---

<sup>44</sup> Vgl. Eckermann, E. (2002). Vom Dampfwagen zum Auto. Bielefeld: Delius Klasing Verlag

## 4 Traditionelle Antriebsformen und Energieträger

In diesem Kapitel werden kurz die traditionellen Antriebsformen wie Ottomotor und Dieselmotor dargestellt. Heute bezeichnet man einen Motor mit Fremdzündung (Benzin) als Ottomotor, einen Motor mit Eigenzündung (Diesel) als Dieselmotor. Ihre Funktionsmechanismen werden kurz erklärt und anschaulich dargestellt. In diesem Kapitel wird auch der auf dem Markt bereits seit 1997 angebotene Hybridantrieb dargestellt, da er zu einem sehr großen Teil noch auf fossilen Brennstoffen beruht und auch direkt von diesen abgeleitet ist.<sup>45</sup>

Die bedeutsamen Erfindungen von Otto und Diesel leiteten vor mehr als 100 Jahren die Entwicklung der Verbrennungsmotoren ein. Heute teilen sich Benzin- und Dieselmotoren den Markt. In Österreich waren im Jahr 2007 46,2% der angemeldeten Personenkraftwagen benzinbetrieben, 53,8% dieselbetrieben.<sup>46</sup> Welche Antriebe sich auch immer in Zukunft durchsetzen werden, sie werden sich alle, zumindest noch in den nächsten Jahrzehnten, mit den konventionellen Antrieben messen lassen müssen.

### 4.1 Technische Grundlagen der Antriebe

Beide Motoren werden heute sowohl als Hubkolbenmotor als auch als Kreiskolbenmotor ausgeführt. Beide Begriffe bezeichnen die Kolbenbewegung im Motor.

#### 4.1.1 Hubkolbenmaschine

Bei einer Hubkolbenmaschine bewegt sich der Kolben zwischen 2 Endpunkten, den Totpunkten. Die Entfernung zwischen diesen Punkten bezeichnet man als Hub(raum). Das Triebwerk der Hubkolbenmaschine besteht aus dem Kolben, der Pleuelstange und der Kurbelwelle. Die Führungsbahn des Kolbens ist der Zylinder. Die Kurbelwelle ist im Kurbelgehäuse gelagert. Die Umwandlung der durch den Verbrennungsprozess entstehenden Druckenergie in mechanische Arbeit findet an der Kolbenoberseite statt. Die dabei entstehenden Kräfte werden über die Pleuelstange zur Kurbelwelle geleitet und erzeugen dort ein Drehmoment. Der Kolben führt zwischen den Totpunkten eine ungleichförmige Bewegung aus. Die Kurbelwelle dagegen rotiert mit konstanter Geschwindigkeit.<sup>47</sup>

<sup>45</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:11ff

<sup>46</sup> Vgl. Wirtschaftskammer Österreich. Die österreichische Verkehrswirtschaft Jahresbericht 2008. S.: 31

<sup>47</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:17

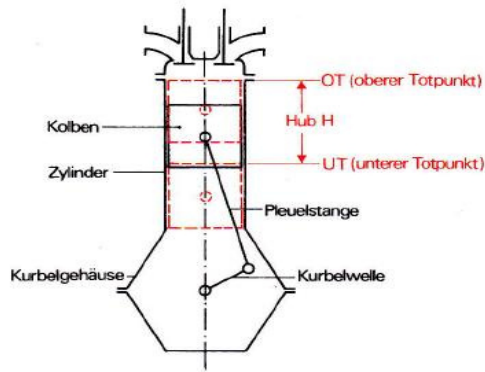


Abb. 12: Hubkolbenmaschine<sup>48</sup>

## 4.1.2 Kreiskolbenmaschine

Bei einer Kreiskolbenmaschine dreht sich der Kolben um seinen eigenen Mittelpunkt und um den Mittelpunkt der Maschine. Vorteile der Kreiskolbenmaschine sind die nicht vorhandenen Bewegungsumformungen und die nicht auftretenden Massenkräfte. Das Triebwerk der Kreiskolbenmaschine besteht aus dem Kolben und der Exzenterwelle. Der Kolben des Kreiskolbenmotors ist drehbar auf dem Exzenter gelagert. Das große innenverzahnte Zahnrad kämmt mit dem kleinen feststehenden Gehäusezahnrad. Der Kolben wird von dem Exzenter und den beiden Zahnrädern auf einer Bahnkurve geführt. An den drei Kolbenstirnflächen vollzieht sich die Umwandlung von Druckenergie in mechanische Arbeit. Die dabei auftretende Kraft drückt auf den Exzenter und bewirkt ein Drehmoment auf die Exzenterwelle. Totpunkte gibt es bei der Kreiskolbenmaschine nicht, ihre Bewegung kommt nie zum Stillstand.<sup>49</sup>

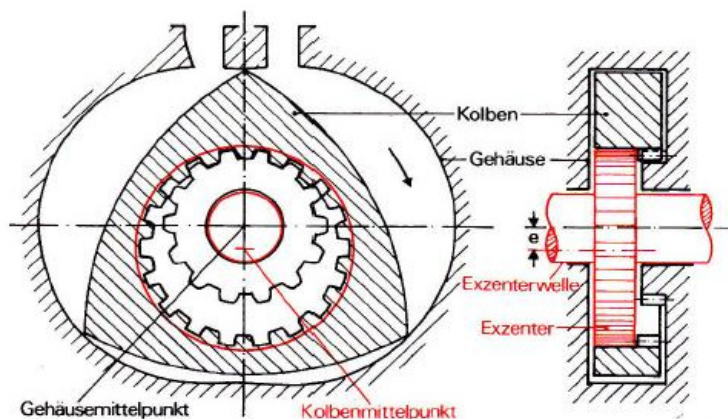


Abb. 13: Kreiskolbenmaschine<sup>50</sup>

<sup>48</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:17

<sup>49</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:17-18

<sup>50</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:17

## 4.2 Arbeitsverfahren der Antriebe

Arbeitsverfahren bezeichnet den Vorgang nach dem sich im Motor die Umwandlung der im Kraftstoff zugeführten Energie in mechanische Arbeit vollzieht. Man unterscheidet beim Hubkolbenmotor zwei grundlegende Arbeitsverfahren nach diesen sowohl Otto- als auch Dieselmotoren arbeiten. Beinahe alle Motoren werden heute einfachwirkend ausgeführt, dies bedeutet, dass nur eine Kolbenseite mit den Verbrennungsgasen in Berührung kommt. Die beiden Arbeitsverfahren in einer Hubkolbenmaschine sind das Zweitakt- und das Viertaktverfahren.

### 4.2.1 Viertaktverfahren

Der Begriff Takt bedeutet den Motor bezogen so viel wie der Hub des Kolbens. Das Viertaktverfahren erstreckt sich über 4 Hübe des Kolbens oder 2 Kurbelwellenumdrehungen. In den einzelnen 4 Takten laufen im Motor folgende Vorgänge ab:

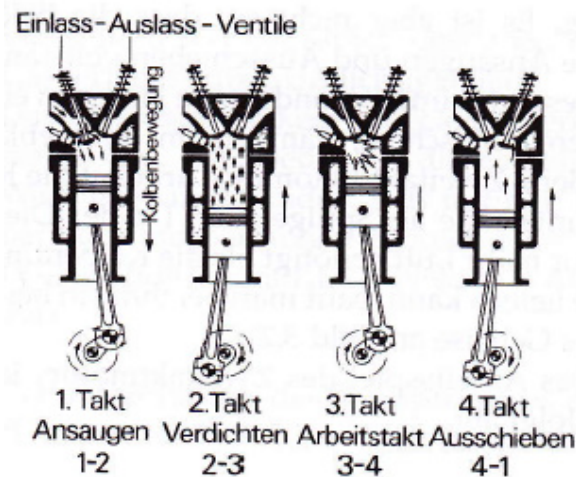


Abb. 14: Viertaktverfahren (hier bei einem Ottomotor, siehe die Zündkerzen)<sup>51</sup>

#### 1. Takt: Ansaugen

Der Kolben bewegt sich bei offenem Einlassventil und geschlossenem Auslassventil vom oberen Totpunkt zum unteren Totpunkt und saugt dabei frische Ladung, also Luft und Treibstoffgemisch, in den Zylinder in dem nun Unterdruck herrscht.

#### 2. Takt: Verdichten

<sup>51</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:51

Bei geschlossenem Einlass- und Auslassventil läuft der Kolben vom unteren Totpunkt zum oberen Totpunkt und verdichtet dabei die Ladung. Der Druck und die Temperatur steigen dabei im Zylinder an. Ihre Endwerte betragen dabei bei einem Dieselmotor etwa 30 bis 50 bar und 550 bis 700°Celsius, bei einem Ottomotor etwa 10 bis 16 bar und 350 bis 450°Celsius.

### 3. Takt: Arbeitstakt

Alle Ventile sind geschlossen, die Verbrennung beginnt bei einer Kolbenposition in der Nähe des oberen Totpunktes. Als Folge der Verbrennung steigen Druck und Temperatur nochmals an. Bei Dieselmotoren steigen die Temperaturen auf circa 2000°Celsius und der Druck beträgt zwischen 60 und 100 bar. Bei Ottomotoren steigt der Druck auf etwa 2500°Celsius und der Druck beträgt zwischen 40 und 70 bar. Nach der Verbrennung dehnt sich das Gas aus, der Kolben wird nach unten gedrückt und verrichtet Arbeit.

### 4. Takt: Ausschieben

Bei geöffnetem Auslassventil und geschlossenem Einlassventil schiebt der Kolben auf dem Weg zum oberen Totpunkt die verbrauchte Ladung aus dem Zylinder, dabei herrscht im Zylinder ein geringer Überdruck.<sup>52</sup>

## 4.2.2 Zweitaktverfahren

Beim Zweitaktverfahren dauert der Arbeitsvorgang nur zwei Hübe des Kolbens oder eine Kurbelwellenumdrehung. Die aus dem Viertaktverfahren bekannten Takte Verdichten und Ausschieben werden dabei allerdings nicht weggelassen sondern werden von einer anderen Maschine, dem Spülgebläse übernommen. Beim Zweitakt-Ottomotor fungiert die Kolbenunterseite als Spülgebläse, beim Zweitakt-Dieselmotor, der mehr Luft für höheren Druck benötigt baut man ein spezielleres Spülgebläse ein.

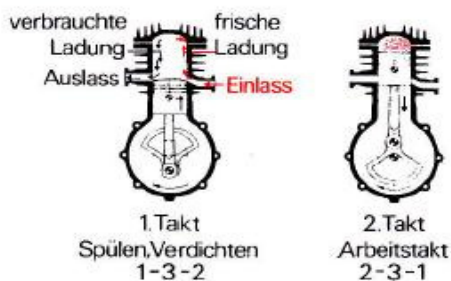


Abb. 15: Zweitaktverfahren<sup>53</sup>

<sup>52</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:51-52

<sup>53</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:52

### *1. Takt: Spülen und Verdichten*

Der Kolben bewegt sich im Zylinder vom unteren Totpunkt zum oberen Totpunkt. Solange der Kolben die Einlass- und Auslassöffnungen noch nicht verdeckt spült die frische Ladung die verbrauchte Ladung aus dem Zylinder. Zu diesem Zweck wird die frische Ladung vom Spülgebläse zu einem geringfügig höheren Druck verdichtet als die verbrauchte Ladung. Nach dem Verschluss der Öffnungen durch den Kolben selbst verdichtet sich die Ladung nochmals. Der Druck ist nun zu vergleichen mit dem Druck in einem Viertaktmotor.

### *2. Takt: Arbeitstakt*

Die Verbrennung der Ladung beginnt, wie beim Viertaktmotor, wenn der Kolben den oberen Totpunkt erreicht hat. Temperatur und Druck erreichen allerdings nicht ganz so hohe Werte beim Arbeitstakt als in einem Viertaktmotor. Danach beginnt sich das Gas auszudehnen und drückt den Kolben nach unten. Sobald der Kolben die Auslassöffnung freigibt pufft die verbrannte Ladung in die Abgasanlage. Sobald die Einlassöffnung frei wird strömt die neue Ladung in den Zylinder, es beginnt wieder mit dem ersten Takt.<sup>54</sup>

## **4.3 Ottomotor**

Der deutsche Ingenieur Nicolaus August Otto wendete bei einem Motor zum ersten Mal das Viertakt-Arbeitsverfahren an. Dieses besteht aus:

- Ansaugen des Gas-Luft-Gemisches
- Verdichten dieses Gemisches
- Verbrennung mit anschließender Ausdehnung des Gases
- Ausschieben des Gases

In der Regel sind Ottomotoren billiger in der Herstellung als Dieselmotoren. Der Ottomotor besticht durch sein geringes spezifisches Leistungsgewicht und vor allem durch seinen größeren nutzbaren Drehzahlbereich. Die folgende Grafik zeigt exemplarisch das Drehmoment (blaue Linie) und die Leistung (rote Linie) eines Ottomotors.

---

<sup>54</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:52-53

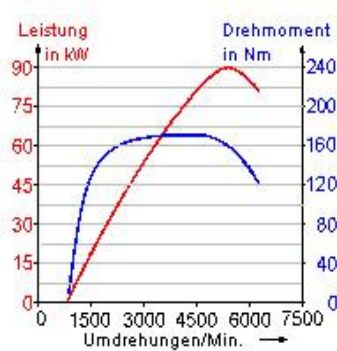


Abb. 16: Leistungskurve Ottomotor<sup>55</sup>

Der Viertakt-Motor war der erste bei dem vor der Verbrennung die Ladung verdichtet wurde, was zu einer signifikanten Steigerung der Leistung und der Effizienz führte.<sup>56</sup> Das Viertaktverfahren wurde bereits im vorigen Kapitel ausführlich beschrieben. Der wichtigste Unterschied zum Dieselmotor ist neben dem Kraftstoff auch die Art der Zündung. Im Ottomotor wird die Ladung, also das Gemisch im Zylinder, fremdgezündet, eine Selbstentzündung im Ottomotor tritt in der Regel nur ungewollt auf. Im Laufe der Entwicklung der Motoren entwickelten sich auch die Zündmechanismen immer weiter, von der Gasflammenzündung, zur Niederspannungs-Abreißzündung, zur Glührohrzündung bis zur heute noch angewendeten Hochspannungszündung.<sup>57</sup>

Der Ottomotor hat sich vor allem bei Personen durchgesetzt die wenig jährliche Fahrleistungen zurücklegen. Auch dort wo sportlicheres Fahren erwünscht ist, etwa bei Motorrädern oder im Rennsport hat sich der Ottomotor auf Grund seines hohen verfügbaren Drehzahlbereichs durchgesetzt.

#### 4.4 Dieselmotor

Die von Erfinder Rudolf Diesel konzipierte Maschine besticht durch den geringen Kraftstoffverbrauch der durch die Einführung der Direkteinspritzung nochmals reduziert werden konnte und durch das hohe Drehmoment im zumeist genutzten unteren Drehzahlbereich. Die folgende Grafik zeigt exemplarisch das Drehmoment (blaue Linie) und die Leistung (rote Linie) eines Dieselmotors.

<sup>55</sup> Vgl. [http://www.leifiphysik.de/web\\_ph09/umwelt\\_technik/08vergleich\\_o\\_d/vergleich\\_o\\_d.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph09/umwelt_technik/08vergleich_o_d/vergleich_o_d.htm) (abgerufen am 27.04.2010)

<sup>56</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:11ff

<sup>57</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:71ff



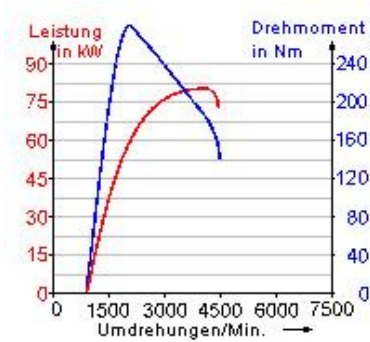


Abb. 17: Leistungskurve Dieselmotor<sup>58</sup>

Im Dieselmotor findet die Entzündung des Gemischs im Zylinder ohne fremde Hilfe statt. Die bei einem Dieselmotor auftretenden hohen Verdichtungsverhältnisse führen dazu, dass sich die Luft im Zylinder so sehr erhitzt, dass die für die Entzündung des Diesels notwendige Temperatur überschritten wird. Nur bei sehr kalten Außentemperaturen kann es sein, dass durch Wandwärmeverluste die Zündtemperatur nicht erreicht wird, zum Beispiel im Winter. Für diesen Fall ist im Zylinder eine Glühkerze installiert, die den Zylinderraum vorwärmt („vorglühen“).<sup>59</sup>

Der Dieselmotor hat sich auf Grund seines niedrigen Verbrauches vor allem bei Vielfahrern durchgesetzt, sein Marktanteil am österreichischen Automarkt stieg in den letzten Jahren kontinuierlich an.

### 4.5 „Ein Liter Auto“

Das Konzept des Ein-Liter-Autos kann zwar als neuer, revolutionärer Ansatz betrachtet werden, ist im Sinne dieser Diplomarbeit keine alternative Antriebsform sondern eine Weiterentwicklung der bekannten Diesel-Technologie. Um dieses Konzept aber nicht unter den Tisch fallen zu lassen wird das Ein-Liter-Auto hier genauer vorgestellt.

Ziel dieses Konzeptes ist es, einen möglichst geringen Kraftstoffverbrauch und eine sehr hohe Effizienz zu erreichen um im großen Rahmen den Flottenverbrauch zu reduzieren. Heute hingegen wird auf diesem Kapitel nur geforscht um die Grenzen des derzeit Machbaren auszuloten. Diese Technologie wird aber nicht 1:1 auf den Markt gebracht, Teile der Erkenntnisse werden für andere Aspekte weiterverwendet. Ob das echte Ein-Liter-Auto auf dem Markt tatsächlich Chancen hat wird die Zukunft weisen.

<sup>58</sup> Vgl. [http://www.leifiphysik.de/web\\_ph09/umwelt\\_technik/08vergleich\\_o\\_d/vergleich\\_o\\_d.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph09/umwelt_technik/08vergleich_o_d/vergleich_o_d.htm) (abgerufen am 27.04.2010)

<sup>59</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:71ff

Die Reduktion des Flottenverbrauchs soll erreicht werden durch die Minimierung von Fahrtwiderständen, durch die Reduktion der Größe der Automobile und durch deutlich niedrigeren Verbrauch in Folge hoher Wirkungsgrade. Das Konzept des Ein-Liter-Autos basiert weiterhin auf den fossilen Energieträgern Benzin und Diesel kann aber theoretisch auch von Brennstoffzellen, oder alternativen Kraftstoffen angetrieben werden. Batterieelektrische Antriebe oder Hybridantriebe mit Batterien kommen auf Grund des Gewichts der mitzuführenden Batterie für dieses Konzept eher nicht in Frage. Sehr attraktiv hingegen sind nach dem derzeitigen Stand der Technik Diesel-Hybrid-Antriebe ohne Batterien, da diese Fahrzeuge einen optimalen Wirkungsgrad aufweisen.

### 4.5.1 Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch

Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch sind unter anderem die Masse, der Rollwiderstand und der Luftwiderstand. Der Rollwiderstand ist zum Fahrzeuggewicht proportional. Eine Reduzierung der Fahrzeugmasse um 10% bedeutet einen um 10% verringerten Rollwiderstand. Der Luftwiderstand hängt von einem großen Teil von der Frontfläche und deren Gestaltung ab. Der durchschnittliche Luftwiderstandswert  $c_w$  hat sich von 1960 bis 1992 um durchschnittlich 45% verbessert. Dieser Wert kann allerdings noch deutlich durch verbessertes Design weiter gesenkt werden ohne den Frontquerschnitt zu reduzieren. Ein hohes Potenzial zur Senkung des Luftwiderstandes bietet auch eine Glättung des Fahrzeugbodens, auf den circa 40% des Luftwiderstandes des gesamten Personenkraftwagens entfallen.

Der wichtigste Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch ist die Gewichtsreduzierung. Bei jedem eingesparten Kilogramm können andere Bauteile kleiner dimensioniert werden ohne dass die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten verändert werden.

Auch das Antriebskonzept muss für ein Ein-Liter-Auto optimiert und überdacht werden, der Leistungsbedarf muss auf effiziente Weise bereitgestellt werden. Möglichkeiten dazu sind die weitere Optimierung und down-sizing der bestehenden Verbrennungsmotoren oder die Einführung von alternativen Antriebsarten. Hier muss das Ziel sein eine langfristig vernünftige und nachhaltige Lösung zu finden.<sup>60, 61</sup>

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Fahrverhalten. Zu einem Ein-Liter-Auto gehört auch ein Ein-Liter-Fahrer. Eine spritsparende Fahrweise, wie sie heute eigentlich schon Standard sein sollte, wird im Alltag leider nur zu selten angewendet. Hier kommt es vor allem

---

<sup>60</sup> Vgl. Dauensteiner A. (2002) Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Berlin: Springer Verlag. S.: 7ff

<sup>61</sup> Vgl. Friedrich H. (2007) Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung? Villigen: Paul Scherrer Institut PSI. S.: 6ff

auf folgende Punkte an, mit denen man bereits heute in hohem Maße Treibstoff sparen kann:

- Niedertourig fahren spart bis zu 20% an Kraftstoff
- Vorausschauend fahren, überflüssige brems- und Beschleunigungsvorgänge vermeiden
- Der Verbrauch wächst mit zunehmenden Tempo überproportional
- Bei Stopps über 10 Sekunden den Motor ausschalten, beim Starten nicht Gas geben
- Leichtlauföl verwenden, dies spart bis zu 5% an Triebstoff
- Auf richtigen Reifendruck und Reifenart achten
- Unnötigen Ballast vermeiden

Für eine optimale Verringerung des Kraftstoffverbrauchs müssen alle aufgezählten Bestandteile miteinander kombiniert werden.<sup>62</sup>

### 4.5.2 Konzepte auf dem Weg

Die folgenden Konzepte zur Verringerung der Fahrwiderstände und zur Verbesserung der Effizienz dienen zur Realisierung eines Ein-Liter-Autos das es möglich macht den Flottenverbrauch entscheidend zu senken. Als optimal anzusehen ist eine Kombination aller drei Konzepte.

#### 4.5.2.1 Leichtbauweise

Schlüsselfaktoren zur Energieeffizienz sind die Minimierung von Leistung, Masse und Luft- und Rollwiderständen. Zusammengenommen ergeben Verbesserungen in diesen Bereichen einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch. Das Prinzip der Leichtbauweise oder Ultra-Leicht-Strategie zeigt die folgende Grafik.

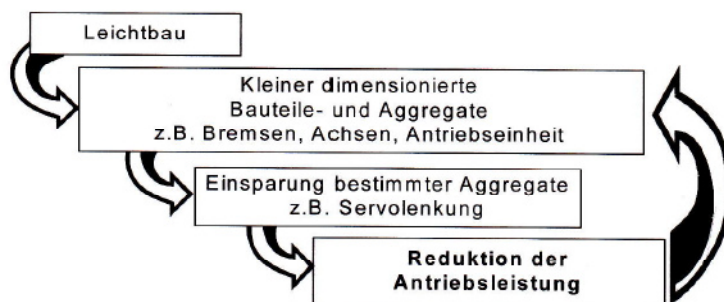


Abb. 18: Ultra-Leicht-Strategie<sup>63</sup>

<sup>62</sup> Vgl. Dauensteiner A. (2002) Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Berlin: Springer Verlag. S.: 18ff

Der gezielte Leichtbau führt zu kleiner dimensionierten Aggregaten und anderen kleineren Bauteilen, was wiederum zu Leichtbau führt. Die genannten Faktoren weisen allerdings nicht alle dasselbe Einsparungspotenzial auf. Bei heute erhältlichen Fahrzeugen weisen Rollwiderstand und Luftwiderstand vergleichbare Potenziale auf. Gewichtsreduktionen am Fahrzeug sind dreimal so effizient. Zur Gewichtsreduktion eignen sich vor allem neue Baustoffe wie Titan, Magnesium, Aluminium, kohlefaserverstärktes Epoxidharz und SMC, ein glasfaserverstärkter Kunststoff.<sup>64</sup>

Für die Gewichtseinsparung am Fahrzeug können verschiedene Leichtbaustrategien unterschieden werden, die sich unterschiedlich auf die Kosten und das Potenzial auswirken. Dies sind im Wesentlichen:

- Stoffleichtbau (Materialsubstitution),
- Formleichtbau (Minimierung des Werkstoffeinsatzes, Optimierung der Geometrie),
- Konzeptleichtbau (Komponentenauswahl, Anpassungsoptimierung, Reduktion der Teilezahl und Fügestellen),
- Bedingungsleichtbau (Veränderung der Kundenanforderungen und der gesetzlichen Anforderungen an ein Fahrzeug).<sup>65</sup>

### 4.5.2.2 Antriebsstrategie

Nach Erreichen der Ultra-Leicht-Bauweise muss auch der Motor angepasst werden. Hier gibt es zwei unterschiedliche Wege: die Optimierung bestehender Otto- und vor allem Dieselmotoren und die Entwicklung von alternativen Antrieben.

Bei der Optimierung von Otto- und Dieselmotoren setzt man vor allem auf die Hubraumreduzierung und auf die Hochaufladung des Treibstoffes bevor er in die Brennkammer eingespeist wird. Bei der Entwicklung alternativer Antriebe setzt man im Leichtbausegment vor allem auf die Brennstoffzelle und den Wasserstoff, diese Technologien sind aber erst langfristig wirtschaftlich sinnvoll.

Die Gasturbine stellt einen generell schadstoffarmen Antrieb dar, kann aber im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen keinen Beitrag zur Senkung leisten. Kurzfristig muss man sich an bereits bekannte alternative Energieträger wenden, etwa das Erdgas. Allerdings sollte man sich in der Zwischenzeit der Entwicklung nachhaltiger Alternativen widmen. Die hier

---

<sup>63</sup> Vgl. Dauensteiner A. (2002) Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Berlin: Springer Verlag. S.: 26

<sup>64</sup> Vgl. Dauensteiner A. (2002) Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Berlin: Springer Verlag. S.: 26ff

<sup>65</sup> Vgl. Friedrich H. (2007) Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung? Villigen: Paul Scherrer Institut PSI. S.: 6

genannten alternativen Antriebsformen werden in den anderen Kapiteln dieser Arbeit näher erklärt.

### 4.5.2.3 Aerodynamik

Der Luftwiderstand eines Fahrzeugs wird durch das Produkt aus dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  und der effektiven Frontfläche  $A$  (Stirnfläche) bestimmt ( $c_w \cdot A$ ). Während bei normalen, variierenden Geschwindigkeiten in der Regel die Beschleunigungswiderstände die dominierende Rolle spielen, ist bei Konstantfahrt, etwa auf der Autobahn, mit höheren Geschwindigkeiten der Luftwiderstand wesentlich: bei 120 km/h ist der Luftwiderstand doppelt so wichtig wie der Rollwiderstand. Hier werden etwa 44 % der Energie für die Überwindung des Luftwiderstands verbraucht.

Heutige Mittelklassefahrzeuge haben im Durchschnitt einen  $c_w$ -Wert von 0,3. Noch 1995 betrug der  $c_w$ -Wert aller verkauften Fahrzeuge 0,35. Der Unterboden bietet noch ein Potenzial von etwa 10 % für eine Verbesserung der Aerodynamik.

Ein weiterer Ansatzpunkt bietet eine Optimierung der Motordurchströmung der Luft. Insgesamt scheint das Erreichen eines  $c_w$ -Wertes von 0,2 möglich. Leider zeigt die Frontfläche von neuen Fahrzeugen, einen gegenläufigen Trend: sie steigt ständig an. Interessanterweise liegt der Wert für  $c_w \cdot A$  über alle Fahrzeugklassen nahezu gleich, im Mittel bei 0,68. Die geringe Frontfläche wird bei kleinen Personenkraftwagen durch eine relativ schlechte Aerodynamik aufgehoben, größere Fahrzeuge haben eine relativ bessere Aerodynamik, jedoch eine große Stirnfläche. Insgesamt ist eine Minderung des aerodynamischen Widerstandes mittelfristig um 10 % möglich.<sup>66, 67</sup>

### 4.5.3 Bewertung des Systems

Das folgende Kapitel widmet sich der Bewertung des Systems Ein-Liter-Auto.

#### 4.5.3.1 SWOT-Analyse des Ein-Liter-Autos

Strengths
<ul style="list-style-type: none"><li>• Geringer Treibstoffverbrauch und verkleinerte Motorisierung führen zu geringen Betriebskosten</li><li>• Geringere Geschwindigkeiten verringern die Schwere von Unfällen</li><li>• Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen</li></ul>

<sup>66</sup> Vgl. Friedrich H. (2007) Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung? Villigen: Paul Scherrer Institut PSI. S.: 7ff

<sup>67</sup> Vgl. Hucho W. (2008) Aerodynamik des Automobils. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag. S.: 54ff

<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserte Aerodynamik und Größenreduktion führen zu geringem Stauraum</li> <li>• Teilweise nur für 2 Passagiere ausgelegt</li> <li>• Verkleinerte Dimensionierung erhöht die Schwere von Unfällen durch kleinere Knautschzone</li> <li>• Von Entwicklungen auf diesem Gebiet (geringer Verbrauch, neue Materialien) profitieren alle Hersteller</li> </ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Verbesserungen bei Werkstoffen und Optimierungen bei Motoren treiben die Entwicklung voran</li> <li>• Leichtbauweise bietet eine vernünftige kurzfristige Alternative bis zur serienreifen Entwicklung von nachhaltigen Energieträgern</li> <li>• Weiter steigende Treibstoffkosten machen Alternativen mit geringem Kraftstoffverbrauch attraktiver</li> </ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerodynamisch optimierte Außenformen stoßen auf Ablehnungen bei potentiellen Käufern</li> <li>• Die Entwicklung von Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen verhindern die Gewichtsreduktion von Motoren und den Einbau in Ein-Liter-Autos</li> <li>• Hohe Preise durch teure, neue Werkstoffe</li> </ul>

#### 4.5.3.2 Stand der Technik und Kosten

Das einzige wirkliche Ein-Liter-Auto L1 von VW ist noch im Prototyp-Stadium. Niedrigenergieautos sind bereits seit mehreren Jahren auf dem Markt. Die Autos mit dem geringsten Verbrauch die von einem Verbrennungsmotor angetrieben werden und in Europa erhältlich sind, sind der VW Lupo 3L TDI und der Audi A2 1.2 3L TDI. Beide Fahrzeuge die von 1998 bis 2005 gebaut wurden verfügten über ein Automatikgetriebe, über eine Start-Stop Automatik. Bei beiden Modellen wurden große Teile des Wagens aus Aluminium, Magnesium und aus Verbundstoffen gefertigt. Dies führte zwar zu einer Gewichtsreduktion von circa 150 bis 200 kg, erhöhte aber den Anschaffungspreis derart drastisch, dass sich die Anschaffung nicht mehr amortisierte. Vom Audi wurden circa 6.500 Stück gefertigt, vom VW wurden weniger als 30.000 produziert bei einem Preis von circa 14.000 Euro je nach Ausstattung.

Die Zeit ist noch nicht reif für Massenfertigungen von Niedrigenergieautos. Dennoch weisen sie vor allem kurz- und mittelfristig ein hohes Potenzial auf Benzin und Diesel zu sparen. Durch echte Großserienproduktion und technische Fortschritte würden die Kosten für ein einzelnes Auto auch noch sinken.<sup>68, 69, 70</sup>

### 4.5.3.3 Versorgungsinfrastruktur

Bei starker Präsenz von Ein-Liter-Autos würde sich für die bestehende Versorgungsinfrastruktur an Tankstellen nichts ändern, die Treibstoffe bleiben, solange die Niedrigenergieautos mit Verbrennungsmotoren angetrieben werden, dieselben. Einzig durch den niedriger werdenden Verbrauch würden unrentable Tankstellen schließen müssen. Dies wäre bei gleich bleibender Entwicklung der Technologie bis zur Serienreife noch mindestens 10 Jahre entfernt.

### 4.5.3.4 Verfügbarkeit der Ressourcen

Bei der Verfügbarkeit der Ressourcen kommt wieder die Vergänglichkeit der fossilen Energieträger zum Tragen. Die Verfügbarkeit wurde bereits in Kapitel 5.2 eingehend erklärt. Kurzfristig wird allerdings auch bei dieser Alternative nur die Optimierung von vor allem Dieselmotoren zur Verfügung stehen. Die anderen Technologien wie Brennstoffzelle, oder Wasserstoff-Verbrennungsmotor sind technisch noch nicht ausgereift genug. Bedingt durch den stark sinkenden Verbrauch würden Ein-Liter-Autos auch die Verfügbarkeit von Erdöl stark verlängern. Dies würde der Menschheit einen längeren Zeitraum verschaffen sich mit den weiteren Entwicklungen auseinanderzusetzen. Die Ein-Liter-Autos sind also kurz- bis mittelfristig die logischen Nachfolger konventioneller Otto- und Dieselmotoren. Auch gasbetriebene Ein-Liter-Autos sind mittelfristig eine Lösung.

---

<sup>68</sup> Vgl. [http://www.welt.de/motor/article715480/Wie\\_viel\\_Kohlendioxid\\_produziert\\_mein\\_Auto.html](http://www.welt.de/motor/article715480/Wie_viel_Kohlendioxid_produziert_mein_Auto.html) (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>69</sup> Vgl. S.: Volkswagen AG. Umweltbericht 1999/2000. 24ff digital unter: [http://www.volkswagen.de/etc/medialib/vwcms/virtualmaster/de/Unternehmen/mobilitaet\\_und\\_nachhaltigkeit/downloads/umweltberichte.Par.0012.File.pdf/umweltbericht\\_1999\\_2000\\_deutsch.pdf](http://www.volkswagen.de/etc/medialib/vwcms/virtualmaster/de/Unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/downloads/umweltberichte.Par.0012.File.pdf/umweltbericht_1999_2000_deutsch.pdf) (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>70</sup> Vgl. [http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/used\\_cars/a2/pdf.Par.0005.File.pdf/a2\\_a0\\_12tdi\\_45kw\\_0302.pdf](http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/used_cars/a2/pdf.Par.0005.File.pdf/a2_a0_12tdi_45kw_0302.pdf) (abgerufen am 26.05.2010)

#### 4.5.4 Praxisbeispiele

Im September 2009 wird die zweite, seriennahe, Auflage des Ein-Liter-Autos von Volkswagen, der L1, der Öffentlichkeit vorgestellt. Schon der Vorgänger, das erste Ein-Liter-Auto der Welt, stammte von Volkswagen. Der Verbrauch der zweiten Version ist zwar etwas höher, dafür ist er absolut alltagstauglich. Der seriennahe Zweisitzer zeigt das Potenzial eines umweltschonenden Voll-Hybrid-Konzepts auf.

	Volkswagen L1
<b>Leistung Verbrennungsmotor</b>	29 kW/39 PS
<b>Treibstoff</b>	Diesel
<b>Leistung Elektromotor</b>	14 kW/19PS
<b>Reichweite</b>	720 km
<b>Kraftstoffverbrauch (l/100km)</b>	1,39 Liter
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	36 g/km
<b>Verkaufspreis</b>	k.A.
<b>Endgeschwindigkeit</b>	160 km/h
<b>Fahrzeuggewicht</b>	380 kg
<b>Länge</b>	3,81 m
<b>Breite</b>	1,2 m
<b>Höhe</b>	1,14 m
<b>c<sub>w</sub>-Wert</b>	0,195

Tabelle 3: Technische Daten VW L1<sup>71</sup>

Mit einem Durchschnittsverbrauch von 1,39 Litern Diesel bei 380 Kilogramm Leergewicht avanciert der extrem stromlinienförmige L1 ( $c_w$ -Wert 0,195) zum sparsamsten Automobil mit Verbrennungsmotor der Welt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen nur 36 g/km. Möglich machen das leichte Werkstoffe, wie Aluminium und Carbonfasern, und das Voll-Hybridkonzept, bestehend aus dem sehr effizienten TDI-Dieselmotor und dem 7-Gang-Doppelkupplungsgetriebe DSG sowie dem dazwischen liegenden Elektromotor. Volkswagen geht derzeit davon aus den L1 ab circa 2013 auf den Markt zu bringen. Der Verkaufspreis steht noch nicht fest, die Herstellungskosten für den L1 betragen circa 35.000 Euro, der ehemalige Vorstandsvorsitzende des VW-Konzerns Ferdinand Piëch glaubte allerdings 2007, dass die Herstellungskosten in der Großserienproduktion auf circa 5.000

<sup>71</sup> Vgl.

[http://www.volkswagen.de/vwcms/master\\_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet\\_und\\_nachhaltigkeit/technik\\_innovation/antriebe/drei\\_zwei\\_eins.popup.html/](http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/technik_innovation/antriebe/drei_zwei_eins.popup.html/) (abgerufen am 26.05.2010)



Euro sinken könnten. Damit wird allerdings nicht vor 2013 gerechnet.<sup>72</sup> Das folgende Foto zeigt den L1 bei seiner Vorstellung auf der Frankfurter Automesse IAA 2009.<sup>73</sup>



Abb. 19: Seriennahe Version VW L1<sup>74</sup>

Eine weitere Konzeptstudie aus dem Jahr 2006 die sich zum Ziel gesetzt hat den Verbrauch so drastisch wie möglich zu reduzieren ist der Daihatsu UFE (Ultra Fuel Economy) III. Der Dreisitzer (einer vorne, zwei hinten) wurde 2006 bereits in dritter Generation präsentiert, zu einer Serienfertigung ist es allerdings bis heute noch nicht gekommen. Das folgende Bild zeigt den Daihatsu UFE III.



Abb. 20: Daihatsu UFE III<sup>75</sup>

<sup>72</sup> Vgl. <http://www.heise.de/autos/artikel/Piechs-Ein-Liter-Auto-nun-im-Museum-Autovision-418303.html> (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>73</sup> Vgl.

[http://www.volkswagen.de/vwcms/master\\_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet\\_und\\_nachhaltigkeit/technik\\_innovation/antriebe/drei\\_zwei\\_eins.popup.html](http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/technik_innovation/antriebe/drei_zwei_eins.popup.html) (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>74</sup> Vgl. [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VW\\_L1.JPG&filetimestamp=20100425214738](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VW_L1.JPG&filetimestamp=20100425214738) (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>75</sup> Vgl. [http://www.hybrid-autos.info/Bilder/Auto\\_Daihatsu\\_UFE\\_III\\_2006\\_gross.jpg](http://www.hybrid-autos.info/Bilder/Auto_Daihatsu_UFE_III_2006_gross.jpg) (abgerufen am 26.05.2010)

Leider veröffentlicht der Konzern keine detaillierten technischen Daten des UFE III, lediglich die äußeren Abmessungen und der Durchschnittsverbrauch werden angegeben. Der Reihen Dreizylinder Atkinson Verbrennungsmotor mit einem Hubraum von 660 ccm wird mit einem elektrischen stufenlosen Getriebe (Powersplit) gekoppelt und treibt 2 Elektromotoren an, einen für die Vorderachse, einen für die Hinterachse.<sup>76</sup>

	Daihatsu UFE III
<b>Leistung Verbrennungsmotor</b>	k.A.
<b>Treibstoff</b>	Diesel
<b>Leistung Elektromotor</b>	k.A.
<b>Reichweite</b>	k.A.
<b>Kraftstoffverbrauch (l/100km)</b>	2,1 Liter
<b>CO2-Emissionen</b>	k.A.
<b>Verkaufspreis</b>	k.A.
<b>Endgeschwindigkeit</b>	160 km/h
<b>Fahrzeuggewicht</b>	440 kg
<b>Länge</b>	3,40 m
<b>Breite</b>	1,48 m
<b>Höhe</b>	1,20 m
<b>cw-Wert</b>	0,168

Tabelle 4: Technische Daten Daihatsu UFE III<sup>77</sup>

Eine weitere Konzeptstudie zum Thema Niedrigenergie-Autos ist von Volkswagen der Up! Lite, ein Hybrid-Viersitzer mit einem Verbrauch von durchschnittlich 2,44 Liter je 100 Kilometer der auf der Los Angeles Auto Show 2009 vorgestellt wurde.

<sup>76</sup> Vgl. [http://www.hybrid-autos.info/Daihatsu\\_UFE\\_III\\_2006.html](http://www.hybrid-autos.info/Daihatsu_UFE_III_2006.html) (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>77</sup> Vgl. <http://www.daihatsu.com/brand/motorshow/tokyo05/ufe3/index.html> (abgerufen am 26.05.2010)

	Volkswagen Up! Lite
Leistung Verbrennungsmotor	38 kW/51 PS
Treibstoff	Diesel
Leistung Elektromotor	10 kW/14PS
Reichweite	800 km
Kraftstoffverbrauch (l/100km)	2,44 Liter
CO2-Emissionen	65 g/km
Verkaufspreis	k.A.
Endgeschwindigkeit	160 km/h
Fahrzeuggewicht	695 kg
Länge	3,84 m
Breite	1,6 m
Höhe	1,40 m
cw-Wert	0,237

Tabelle 5: Technische Daten VW Up! Lite:<sup>78</sup>

Der Verkaufspreis wird circa 8.500 Euro betragen. Auch beim Up! Lite ist mit einer Serienfertigung, wenn überhaupt, nicht vor 2013 zu rechnen. Die folgende Grafik zeigt den VW Up! Lite bei seiner Präsentation auf der Los Angeles Autoshow 2009.



Abb. 21: VW Up! Lite<sup>79</sup>

<sup>78</sup> Vgl.

[http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info\\_center/de/themes/2009/12/volkswagens\\_up\\_lite\\_concept\\_counsumes\\_just\\_2\\_44\\_l\\_100\\_km.html?context=CMS](http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/de/themes/2009/12/volkswagens_up_lite_concept_counsumes_just_2_44_l_100_km.html?context=CMS) (abgerufen am 26.05.2010)

#### 4.5.5 Zusammenfassung Ein-Liter-Auto

- Bereits vor über 10 Jahren gab es seitens von VW und Audi Versuche Niedrigenergieautos auf den Markt zu bringen. Damals allerdings scheiterte eine weitere Verbreitung an den hohen Kosten und auch an anderen negativen Aspekten, etwa dem geringen Stauraum.
- Erste realistische Versuche Ein-Liter-Autos auf den Markt zu bringen wurden erst wieder mit einigen Vorstellungen auf Auto Messen im Jahr 2009 unternommen. Mit zunehmendem Benzin- und Dieselpreis werden spritsparende Autos immer attraktiver, da sich die Amortisationsdauer immer weiter verkürzt. Doch das Gesamtpaket ist bei weitem noch nicht ausgereift. Die Motorisierung und die Antriebsstrategie sind bereits serienreif, allerdings kosten gewichtssparende Stoffe wie Aluminium, Magnesium und Verbundstoffe noch zu viel um auf dem Markt konkurrenzfähig sein.
- Ein gravierender Negativpunkt ist die geringe Größe, die sich zum Beispiel für Firmenwagen und Familienautos nicht eignet. Ein-Liter-Autos mit herkömmlichem Verbrennungsmotor werden immer nur für eine beschränkte Anzahl an Passagieren und mit einem geringen Stauraum vorgesehen sein.
- Langfristig, wenn die Brennstoffzelle und die Wasserstoff-Technologie ausgereift sind auch größere Ein-Liter-Autos vorstellbar. Kurzfristig, als spritsparende Alternative, sind Ein-Liter-Autos allerdings sehr attraktiv. Niedrigenergieautos werden auch von der Politik und von Wirtschaftsorganisationen gefördert. So fordert die Wirtschaftskammer Österreich in ihren Energiepolitischen Strategien bis 2015 Niedrigenergieautos zu forcieren.<sup>80</sup>

#### 4.6 Benzin und Diesel

Benzin ist ein Sammelbegriff für chemische Verbindungen aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen die aus Erdöl gewonnen werden. Der Name Benzin stammt aus dem Arabischen und wurde vom Benzoeharz abgeleitet. Der Dieselmotorkraftstoff wurde an Hommage an Rudolf Diesel, den Erfinder der damit angetriebenen Maschine, benannt.

---

<sup>79</sup> Vgl. <http://www.autoplenum.de/Bilder/testreports/STG20091203040617/VW-Up-Lite.jpg> (abgerufen am 26.05.2010)

<sup>80</sup> Vgl. Wirtschaftskammer Österreich: Energiepolitischen Strategien bis 2015. Digital abrufbar unter: [http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:upm3yPfnUIYJ:portal.wko.at/wk/dok\\_detail\\_file.wk%3FAngeID%3D1%26DocID%3D1008477%26ConID%3D373878+Energiepolitische+Strategien+-+Energiepolitische+Ziele+der+WK%C3%96+bis+2015&hl=de&pid=bl&srcid=ADGEEsghrBOgKrnUal4lohtxfPkKuzhIGnYSCEXe8PeNo2cDpgFBFkXm1VHxXH3DWAsMLokmOwSxltHNeAcsU5qAK1Plh3gFXjQH53kBAlybUmo7dSAmFhLOq1B-1PHroFMUI44rh7&sig=AHIEtbTin-XRnUdRahFc6hMo9usuLwVN7A](http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:upm3yPfnUIYJ:portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk%3FAngeID%3D1%26DocID%3D1008477%26ConID%3D373878+Energiepolitische+Strategien+-+Energiepolitische+Ziele+der+WK%C3%96+bis+2015&hl=de&pid=bl&srcid=ADGEEsghrBOgKrnUal4lohtxfPkKuzhIGnYSCEXe8PeNo2cDpgFBFkXm1VHxXH3DWAsMLokmOwSxltHNeAcsU5qAK1Plh3gFXjQH53kBAlybUmo7dSAmFhLOq1B-1PHroFMUI44rh7&sig=AHIEtbTin-XRnUdRahFc6hMo9usuLwVN7A) (abgerufen am 26.05.2010)

Erdöl ist gelb bis schwarz gefärbt und hat je nach Zusammensetzung einen neutralen bis stechenden Geruch. Das Erdöl enthält vorwiegend Bestandteile von vergorenen Meeresorganismen die sich unter enormen Druck und Luftabschluss umgewandelt haben. Die wichtigsten chemischen Bestandteile des Erdöls sind Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel und Stickstoff. Die Exploration von Erdölfeldern ist die Aufgabe von Geologen. Diese Fachleute bedienen sich modernster Technik um Rohöllagerstätten zu finden. Luftbilder (Photogrammetrie), Schweremessung (Gravimetrie), Seismographie und Probebohrungen gehören zu den angewendeten Mitteln. In Raffinerien wird das Erdöl in Benzin und Diesel umgewandelt.

Die zwei wichtigsten Methoden zur Herstellung von Benzin und Diesel sind die Destillation von Erdöl und das Cracken von Erdöl.

Bei der Destillation von Erdöl werden die verschiedenen Flüssigkeiten des Erdöls zwischen 40°C und 200°C verdampft und einzeln wieder verflüssigt. In speziellen Destillationskolonnen werden die einzelnen Flüssigkeiten unter Luftabschluss mittels fraktioneller Destillation in die vier verschiedenen Benzinarten zerlegt. Petrolether, Leichtbenzin, Mittelbenzin (Motorenbenzin) und Schwerbenzin (Testbenzin). Die folgende Grafik zeigt den Verlauf einer solchen Destillationskolonne.<sup>81, 82</sup>

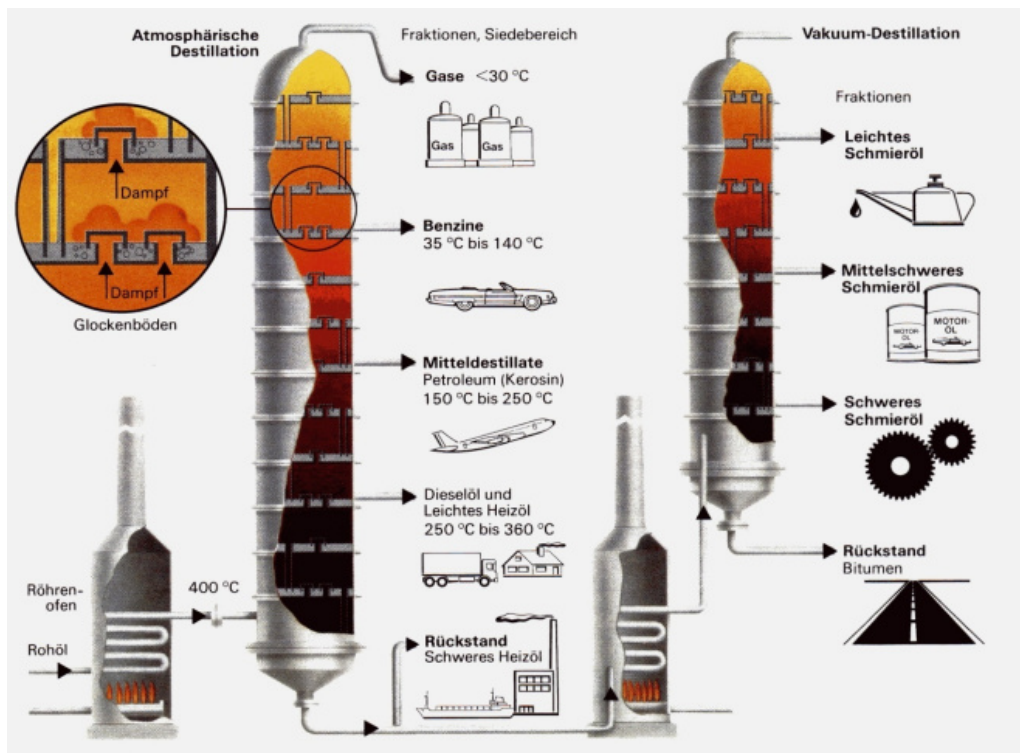


Abb. 22: Destillationskolonne<sup>83</sup>

<sup>81</sup> Vgl. Frenzen, S. (1998). Erdöl und Erdgas – Eine fachwissenschaftliche Abhandlung. München: GRIN Verlag. S.: 2-3

<sup>82</sup> Vgl. Fischer, V. (2000). Benzin – Der Weg des „Schwarzen Goldes“ vom Erdinneren bis zur Zapfsäule. München: GRIN Verlag. S.: 7ff

<sup>83</sup> Vgl. [http://www.modellbau-freunde-lohne.de/html/vom\\_erdol\\_zum\\_kunststoff\\_t\\_03.HTM](http://www.modellbau-freunde-lohne.de/html/vom_erdol_zum_kunststoff_t_03.HTM) (abgerufen am 27.04.2010)

Beim Cracken von Erdöl gibt es zwei Verfahrensarten. Das thermische und das katalytische Cracken. Beim thermischen Crackverfahren erhitzt man Rohöl unter einem Druck von 70 bar bis zu einer Temperatur von 800°C. Es tritt dadurch eine Fragmentierung der verschiedenen Bestandteile auf die durch den Einsatz von Katalysatoren wie Aluminiumoxid begünstigt wird.

Die katalytische Crackmethode hat die thermische Methode heute allerdings zum Großteil verdrängt. Bei der katalytischen Crackmethode werden als Katalysatoren vor allem Zeolithe eingesetzt, die chemische Umwandlungen und Spaltungen fördern. Deshalb haben die Crackbenzine höhere Oktanzahlen<sup>84</sup>, als die Benzine, die bei thermischen Verfahren entstehen. Die folgende Grafik zeigt sehr vereinfacht die Vorgänge beim Cracken von Benzin und Diesel.<sup>85</sup>

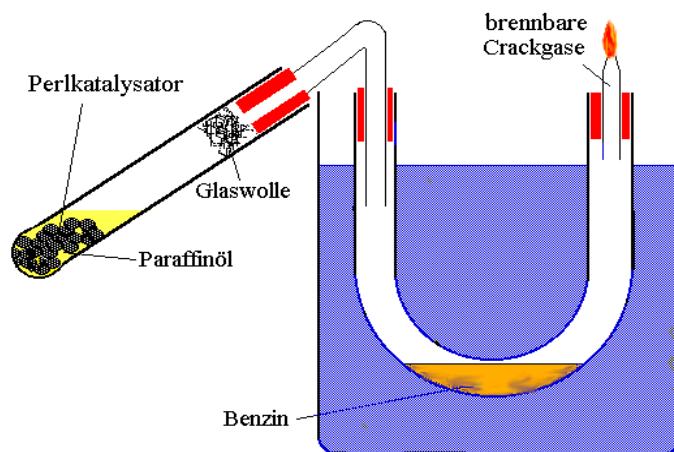


Abb. 23: Katalytisches Cracken<sup>86</sup>

Benzin hat einen sehr hohen Brennwert. Ein Kilogramm Benzin liefert bei der Verbrennung ca. 42 MJ/kg. In Wasser ist Benzin unlöslich und aufgrund der geringeren Dichte schwimmt es auf der Wasseroberfläche. Seine Dichte ist zwischen 0,72 Vol % und 0,76 Vol % anzusiedeln.<sup>87, 88</sup> Das gewöhnliche Benzin für den Hausgebrauch ist eine klare, leicht verdunstende, sehr feuergefährliche Flüssigkeit. Diese Flüssigkeit ist leicht brennbar und entwickelt einen sehr strengen, beißenden Geruch. Wegen der vielen Zusammensetzungen von Benzin unterscheidet man mehrere Arten von Benzin:

- Petrolether (Verwendung als Wundbenzin oder Lösungsmittel)

<sup>84</sup> Die Oktanzahl gibt die Klopfestigkeit von Kraftstoffen an. Eine hohe Zahl bedeutet hohe Klopfestigkeit und geringe Neigung zu unerwünschten Frühzündungen im Brennraum.

<sup>85</sup> Vgl. Frenzen, S. (1998). Erdöl und Erdgas – Eine fachwissenschaftliche Abhandlung. München: GRIN Verlag. S.: 3-6

<sup>86</sup> Vgl. <http://www.raumzeitwellen.de/SAL/sal5/kw-oiel/cracken.htm> (abgerufen am 27.04.2010)

<sup>87</sup> Vgl. Grohe, H. Russ, G. (2007). Otto- und Dieselmotoren. Würzburg: Vogel Industrie Medien. S.:130-132

<sup>88</sup> Vgl. IFA GESTIS Stoffdatenbank:

<http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll/Infobase/uberschrift43645?f=templates&fn=main-h.htm&2.0> (abgerufen am 27.04.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Testbenzin ( Verwendung als Lösungsmittel in Farben und Lacken)
- Normalbenzin (Verwendung als Kraftstoff)
- Petroleum (Verwendung als Brennstoff und Reinigungsmittel)

Diesel hat ebenfalls einen sehr hohen Brennwert. Ein Kilogramm Benzin liefert bei der Verbrennung ca. 45,4 MJ/kg. In Wasser ist Diesel ebenfalls unlöslich und aufgrund der geringeren Dichte schwimmt es auf der Wasseroberfläche. Seine Dichte ist zwischen 0,82 Vol % und 0,845 Vol % anzusiedeln, und ist damit schwerer als Benzin. Diesel ist, genauso wie Benzin, leicht brennbar.<sup>89</sup> Auch bei Diesel kann zwischen mehreren Arten unterschieden werden die sich für jeweils verschiedene Aufgabengebiete eignen:

- Dieseldieselkraftstoff (Verwendung als Treibstoff für PKW, LKW)
- Schiffsdiesel (Verwendung als schwererer Treibstoff für Schiffe)

Die folgende Tabelle soll einen kurzen Überblick über die chemischen Eigenschaften von Diesel und den handelsüblichen Benzinen liefern. Die Datengrundlage bildete die GESTIS-Stoffdatenbank<sup>90</sup> vom Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.

	Dieseldieselkraftstoff	Benzin
<b>Aggregatzustand</b>	flüssig	flüssig
<b>Kinematische Viskosität</b>	4,5mm <sup>2</sup> /s (40°C)	0,53mm <sup>2</sup> /s (20°C)
<b>Dichte</b>	0,82-0,845 (15°C)	0,72-0,775 (15°C)
<b>Heizwert</b>	11,8kWh/kg (42,5MJ/kg)	11,1-11,6kWh/kg (40,1-41,8MJ/kg)
<b>Brennwert</b>	45,4MJ/kg (12,6kWh/kg)	42,7-44,2MJ/kg (11,9-12,3kWh/kg)
<b>Cetan/Oktananzahl</b>	zw. 51 und 60 CZ	zw. 91 ROZ und 100 ROZ
<b>Siedebereich</b>	170-390°C	(25-210)°C
<b>Flammpunkt</b>	>55°C	-21°C
<b>Zündtemperatur</b>	220°C	(200-300)°C

Tabelle 6: Vergleich Dieseldieselkraftstoff - Benzin<sup>91, 92</sup>

<sup>89</sup> Vgl. IFA GESTIS Stoffdatenbank:

<http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll/Infobase/uberschrift17823?f=templates&fn=main-h.htm&2.0> (abgerufen am 27.04.2010)

<sup>90</sup> <http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll?f=templates&fn=main-h.htm> (abgerufen am 28.04.2010)

<sup>91</sup> Vgl. IFA GESTIS Stoffdatenbank:

<http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll/Infobase/uberschrift43645?f=templates&fn=main-h.htm&2.0> (abgerufen am 28.04.2010)

#### 4.7 SWOT-Analyse von Otto- und Dieselmotoren

<b>Strengths</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die Technologie der Otto- und Dieselmotoren wird seit Jahrzehnten perfektioniert. Die Technologie ist ausgereift.</li><li>• Die Versorgungsinfrastruktur ist perfekt ausgebaut.</li><li>• Otto- und Dieselmotoren befriedigen alle Kundenwünsche und sind der Gradmesser für alle anderen Antriebe und Treibstoffe.</li><li>• Benzin und Diesel sind universell einsetzbar.</li></ul>
<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die verwendeten Treibstoffe basieren komplett auf fossilen, endlichen, Energieträgern. Niemand kann genau sagen wie lange bei gleich steigendem Verbrauch die Vorräte noch reichen werden.</li><li>• Der Betrieb erzeugt Emissionen und Lärm.</li><li>• Auf Grund der steigenden Nachfrage reicht das Erdöl nicht so lange wie erwartet.</li><li>• Die Förderung und der Transport von Erdöl führen in regelmäßigen Abständen zu gewaltigen Naturkatastrophen.</li></ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Der technologische Fortschritt der Alternativen entwickelt sich nicht wie erwartet, Otto- und Dieselmotor bleiben länger die dominanten Treibstoffe auf dem Markt.</li><li>• Der Verbrauch von Otto- und Dieselmotoren sinkt bedingt durch technische Fortschritte weiterhin.</li></ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alternative Antriebsformen dringen schneller auf den Markt als erwartet.</li><li>• Hybridautos und Niedrigenergieautos bilden bald eine marktfähige Konkurrenz.</li><li>• Durch steigende Treibstoffpreise werden Alternativen immer attraktiver.</li><li>• Emissionen werden zukünftig stärker besteuert, die anderen Alternativen werden billiger.</li></ul>

<sup>92</sup> Vgl. IFA GESTIS Stoffdatenbank:

<http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll/Infobase/uberschrift17823?f=templates&fn=main-h.htm&2.0> (abgerufen am 28.04.2010)



## 5 Alternative Antriebsformen

Das folgende Kapitel ist als das Herzstück der Arbeit zu sehen. Es werden die alternativen Antriebsformen vorgestellt. Sowohl die groben Funktionsweisen, die Betriebsstrategien, die Marktchancen als auch Praxisbeispiele und Zukunftsperspektiven werden in diesem Kapitel behandelt.

Bei alternativen Antrieben kann man unterscheiden zwischen verschiedenen Motortechniken und zwischen verschiedenen Energieträgern. Die folgende Grafik zeigt, welche Motoren mit welchen Energieträgern kompatibel sind.

Motor	Verbrennungsmotor	Elektromotor	Verbrennung/Elektro Kombination	Brennstoffzelle
Energieträger				
Erdöl				
Erdgas				
biologische Kraftstoffe				
elektrischer Strom				
Sonnenenergie				
Wasserstoff				

Abb. 24: Kombination von Energieträgern und Motortypen

Legende:



.....Kombination aus Motortyp und Energieträger funktioniert



.....Kombination aus Motortyp und Energieträger funktioniert nicht

## 5.1 Hybridantrieb

Dem Hybridantrieb, wie er bereits seit Jahren auf dem Markt angeboten wird, wird vor allem in naher Zukunft großes Potential zugetraut, da von allen alternativen Antriebsformen die Technologie am ausgereiftesten ist.<sup>93</sup> Dieses Konzept setzt zwar auch auf fossile Brennstoffe, hat aber vor allem kurz- und mittelfristig das Potential den Flottenverbrauch in einem großen Ausmaß zu senken. Er wird mit Benzin oder Diesel und mit einer oder mehreren Elektromotoren angetrieben und vereint so die Vorteile von einem batteriegetriebenen Elektroauto und einem Verbrennungsmotor. Reine Elektromobile können im derzeitigen Entwicklungsstadium die Ansprüche der Nutzer vor allem in puncto Reichweite nicht erfüllen.<sup>94</sup> Bei der Optimierung des Gesamtwirkungsgrades wurden in Fahrzeugen mit nur einer Antriebsart bis dato folgende drei Punkte nicht voll ausgeschöpft:

- *Bremsenergie:*

Beim Abbremsen des Personenkraftwagens wird kinetische Energie (Bewegungsenergie) in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Energie kann für den Antrieb des PKW generiert werden.

- *Optimaler Drehzahlbereich:*

Bei PKW mit Verbrennungsmotoren wird der Motor zumeist in Drehzahlbereichen verwendet in dem er nicht den optimalen Wirkungsgrad aufweist. Es wird mehr Leistung produziert als benötigt. Bei Hybridautos kann diese Energie zwischengespeichert werden.

- *Verlust von Energie im Leerlauf:*

Für den Antrieb im Leerlauf wird keine Energie benötigt, der Verbrennungsmotor verbraucht aber Energie.<sup>95</sup>

### 5.1.1 Strukturvarianten

Hybridantriebe können auf verschiedene Arten konzipiert und dimensioniert werden. Man unterscheidet zwei verschiedene Grundvarianten: serieller Hybridantrieb und paralleler Hybridantrieb. Durch Mischformen versucht man die Vorteile der einzelnen Varianten zu verbinden. Das folgende Kapitel verschafft einen Überblick über den groben technischen Aufbau der verschiedenen Varianten.

---

<sup>93</sup> Vgl. Back, M. (2005). Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe: Universitätsverlag. S.:2ff

<sup>94</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:73

<sup>95</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.2

### 5.1.1.1 Serieller Hybridantrieb

Bei einem Fahrzeug mit seriellen Hybridantrieb gibt es keine Mechanische Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und den Rädern. Der Verbrennungsmotor erzeugt über einen Generator elektrischen Strom der den oder die Elektromotoren oder die Batterie mit Energie versorgen, es handelt sich also um eine Reihenschaltung der Energiewandler. Die folgende Grafik zeigt verschiedene Bauformen des seriellen Hybridantriebes.

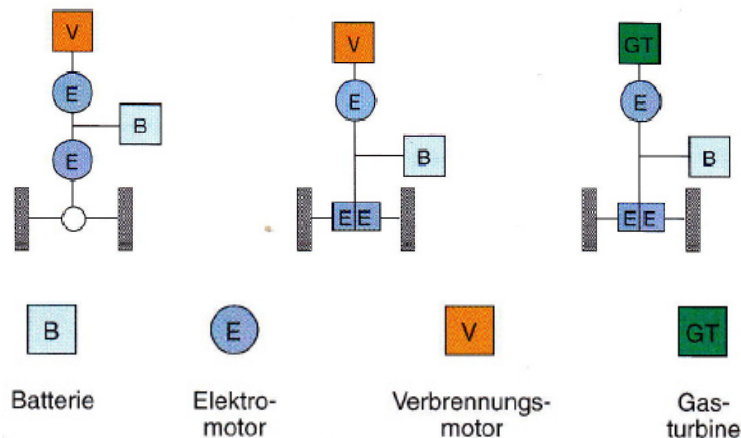


Abb. 25: Serieller Hybridantrieb<sup>96</sup>

Der Vorteil dieses Konzeptes ist es, dass der Verbrennungsmotor in einem mehr oder weniger gleichbleibenden, unter Emissions- und verbrauchsgesichtspunkten optimalen Drehzahlbereich betrieben wird. Er Lädt die Batterie in diesem betriebspunktentkoppelten Verfahren unabhängig vom derzeitigen Energieverbrauch auf. Die Dimensionierung des Motors hängt von der Speicherkapazität der Batterie ab, und diese wiederum vom Einsatzzweck des Fahrzeuges. Ein weiterer Vorteil des seriellen Hybridantriebes ist, dass die einzelnen Komponenten sehr flexibel angeordnet werden können. Da meist kein mehrstufiges Getriebe benötigt wird.

Ein klarer Nachteil des seriellen Hybridantriebes ist die lange Wirkungsgradkette, denn durch den zusätzlichen Generator treten ebenso Energieverluste auf wie bei der Speicherung in der Batterie. Wird der Verbrennungsmotor so betrieben, dass er mehr Strom erzeugt als benötigt und gespeichert werden kann, wird der Emissions- und Wirkungsgradvorteil des Hybridfahrzeugs zunichte gemacht. In Summe ist eine Verbrauchsreduzierung je nach Einsatzzweck um bis zu 35% möglich.<sup>97, 98, 99, 100</sup>

<sup>96</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:74

<sup>97</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:73ff

<sup>98</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.4

<sup>99</sup> Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 299ff

<sup>100</sup> Vgl Back, M. (2005). Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe: Universitätsverlag. S.:5ff

### 5.1.1.2 Paralleler Hybridantrieb

Beim parallelen Hybridantrieb sind sowohl die Verbrennungsmotor als auch der oder die Elektromotoren mit den Rädern verbunden, es liegt also eine Parallelschaltung der Energiewandler vor. Die folgende Grafik zeigt verschiedene Bauformen des parallelen Hybridantriebes.

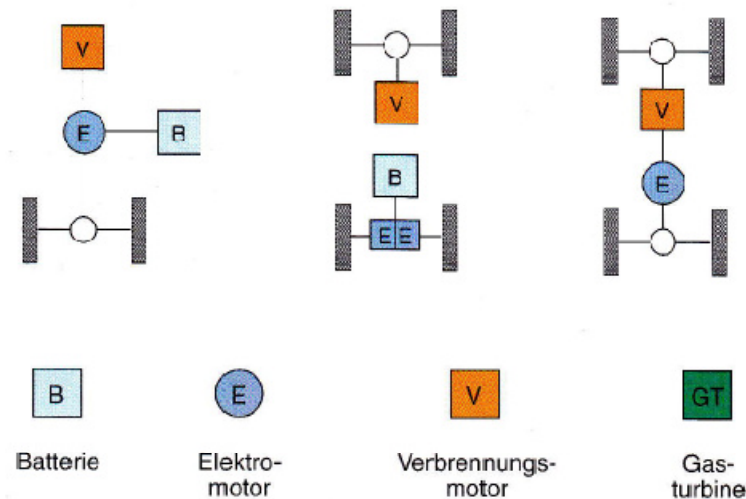


Abb. 26: Paralleler Hybridantrieb<sup>101</sup>

Die Leistungen der beiden Motoren addieren sich beim parallelen Antrieb, daher können beide Energiewandler kleiner dimensioniert werden. Je nach Anforderungsprofil können nur einer der Motoren oder beide gleichzeitig eingesetzt werden und so in ihrem optimalen Wirkungsbereich arbeiten. Der Elektromotor eignet sich für den Stadtverkehr, der Verbrennungsmotor bei Überlandfahrten und auf der Autobahn. Wenn der Verbrennungsmotor hinsichtlich des Wirkungsgrades auf höherer Leistung als benötigt gefahren wird speichert sich die überschüssige Energie in einer Batterie. Die mechanischen Leistungen der verschiedenen Motoren können auf drei verschiedene Arten kombiniert werden: mittels Drehzahladdition und Planetengetriebe, mittels Momentenaddition und Stirnradgetriebe oder mittels Zugkraftaddition, bei der die Motoren auf verschiedenen Achsen wirken.

Der Vorteil des parallelen Hybridantriebes ist es, dass der Fahrer sein Automobil wie ein vertrautes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor nutzen kann, der Elektroantrieb wird nur bei Bedarf zugeschaltet. Nachteile sind, dass die Energiewandler nicht flexibel im Fahrzeug untergebracht sein können und die Energieverluste durch die zusätzlichen Getriebe und Kupplungen.<sup>102, 103, 104, 105</sup>

<sup>101</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:74

<sup>102</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:76ff

<sup>103</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.5

### 5.1.1.3 Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Beim leistungsverzweigten Hybrid wird ein Teil der Leistung des Verbrennungsmotors direkt mechanisch auf die Räder übertragen, der andere Teil der Energie wird über ein Planetengetriebe und Elektromotoren auf die Räder übertragen oder überschüssige Energie in der Batterie gespeichert. Das Verhältnis der Leistungsanteile, die indirekt oder direkt zur Antriebsachse fließen, kann über die Leistungsaufnahme des Generators variiert werden. Die folgende Grafik zeigt verschiedene Bauformen des leistungsverzweigten Hybridantriebes.

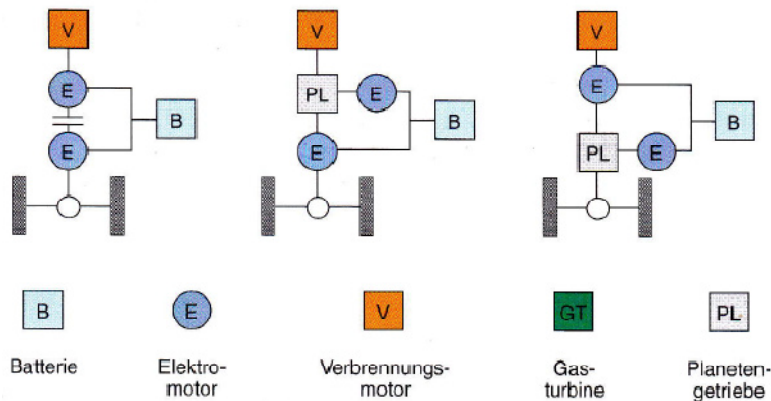


Abb. 27: Leistungsverzweigter Hybridantrieb<sup>106</sup>

Durch diese Bauform können die Elektromotoren als stufenlos verstellbares Getriebe wirken. Ein weiteres Getriebe für den Verbrennungsmotor ist dabei nicht mehr notwendig. Der Wirkungsgrad eines Leistungsverzweigten Hybridantriebes ist höher als bei den anderen Strukturvarianten, auch der Verbrauch ist geringer, sein Aufbau ist allerdings sehr komplex.<sup>107, 108, 109, 110</sup>

<sup>104</sup> Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 299ff

<sup>105</sup> Vgl Back, M. (2005). Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe: Universitätsverlag. S.:5ff

<sup>106</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:74

<sup>107</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:77ff

<sup>108</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.5ff

<sup>109</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 299ff

<sup>110</sup> Vgl Back, M. (2005). Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe: Universitätsverlag. S.:6ff

### 5.1.2 Der Energiespeicher

Sehr wichtig für die Marktfähigkeit von Hybridantrieben ist die Speicherung von Energie in der mitgeführten Batterie. Diese ist auch der Grund, warum sich elektrische und vor allem auch hybride Antriebe auf dem Markt nicht in großer Menge durchsetzen konnten und nur in Nischenanwendungen zu finden ist.<sup>111</sup>

Die zurzeit entwickelten Energiespeicher haben zwei entscheidende Schwachstellen:

- Sie sind zu teuer
- und sie weisen eine zu geringe Energiedichte auf.

Moderne Metall-Hybrid-Batterien die als Ultra High Power Units in Hybridfahrzeugen eingebaut werden weisen mit 80Wh/kg nahezu die vierfache Energiedichte einer gewöhnlichen Blei-Batterie auf. Dies hat allerdings auch seinen Preis: 750 Euro/kWh gegenüber 150 Euro/kWh für gewöhnliche Bleibatterien. Eine Bleibatterie die dieselbe Leistung erbringen soll wie eine moderne Metall-Hybrid-Batterie würde eine Tonne wiegen und so groß sein wie das Auto selbst. Dieser Vergleich zeigt, dass die Batterietechnik noch nicht ausgereift ist.<sup>112</sup> Die folgende Tabelle zeigt technische Kennwerte zurzeit verfügbarer Batteriemodelle.

System	Blei-Säure Batterie	Ni-MH Batterie	Li-Ionen Batterie	Doppelschichtkondensatoren
Betriebstemperatur (°C)	-30 bis +60	-20 bis +65	-50 bis +60	-30 bis +70
Zyklusfestigkeit (Zyklen)	100 - 1.000	300 - 1.000	500 - 1.200	500.000
Energiedichte (Wh/kg)	30 - 50	50 - 80	90 - 150	1 - 6
Selbstentladung (%/Monat)	<10	<20	<5	<50

Tabelle 7: Hauptkenngrößen elektrischer Energiespeicher<sup>113, 114</sup>

In der Regel werden Batteriezellen in vielfacher Reihenschaltung zur Energiespeicherung eingesetzt. Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Batterien gehören derzeit aufgrund

<sup>111</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 241

<sup>112</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 241ff

<sup>113</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 241

<sup>114</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.8

ihrer hohen Leistungsfähigkeit auch bei relativ niedrigen oder hohen Ladezuständen zu den favorisierten Typen im Automobilbereich. Bleibatterien sind nicht für den Einsatz als Hybridbatterien geeignet, da die hohen Energieumsätze im teilentladenen Zustand zu einer deutlich verkürzten Lebensdauer führen.

In allen zurzeit in Serie gefertigten Hybrid-PKW's finden sich ausschließlich Nickel- Metallhydrid Akkumulatoren. Auch wenn die Bleibatterie gegenüber der Nickel-Metallhydrid-Batterie folgende Vorteile aufweist:

- hohe Überladetoleranz
- geringe Selbstentladung
- geringer Innenwiderstand

Aufgrund der geringen Energiedichte wurden die Bleibatterien allerdings sehr bald von Ni-MH-Batterien verdrängt.<sup>115, 116, 117</sup>

### 5.1.3 Betriebsstrategie

Die Leistungsfähigkeit und der Wirkungsgrad eines Hybridfahrzeuges hängen von einem sehr großen Teil von der Betriebsstrategie ab. Also davon, wann welche Antriebskomponente eingesetzt wird. Diese Betriebsstrategie hängt laut Gerl (2002) von einzelnen, sich teilweise widersprechenden Parametern ab:

- Auslegung des Antriebs als serieller oder paralleler Hybridantrieb
- Dem Zustand der Energiespeicher (Tank, Batterie)
- Dem Leistungsbedarf des Fahrzeuges
- Der Fahrzeuggeschwindigkeit
- Emissionen
- Betriebstemperaturen
- Zeitkonstanten

Ziel einer Betriebsstrategie ist in der Regel, durch eine geeignete Kombination und Betriebsweise der Einzelkomponenten den gesamten Antriebsstrang mit möglichst geringem Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch und niedrigen Schadstoffemissionen zu betreiben. Um auf dem Markt ein ernst zu nehmender Konkurrent zu Otto- und Dieselmotor zu sein, muss das Fahrzeug sich wie ein vertrautes, konventionelles Automobil fahren lassen. Ein Beispiel für eine optimale Betriebsstrategie eines parallelen Hybridantriebes liefert Gerl (2002) in der folgenden Grafik:

---

<sup>115</sup> Vgl. Claus, M. (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier S.9

<sup>116</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 243ff

<sup>117</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:79ff

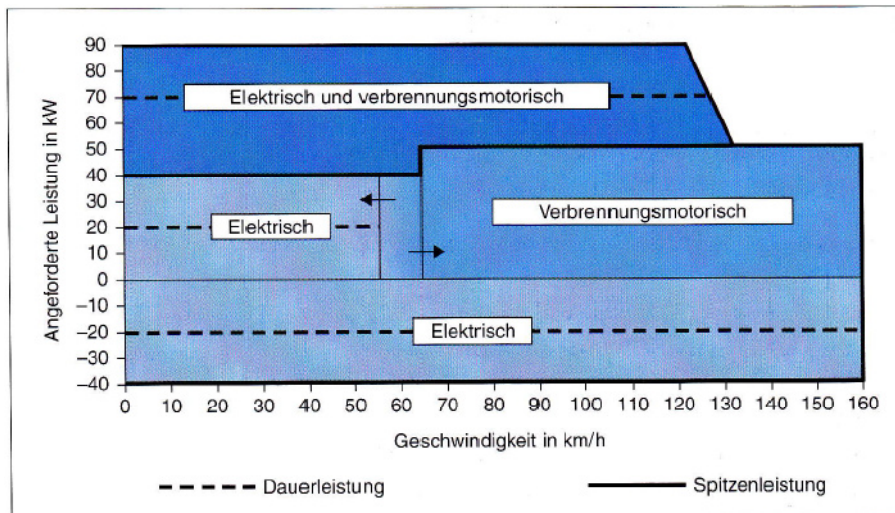


Abb. 28: Betriebsstrategien in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der geforderten Leistung<sup>118</sup>

- Bei konstanter Fahrt im ersten und zweiten Gang wird der Elektromotor genutzt.
- Im dritten und vierten Gang wird der Verbrennungsmotor genutzt.
- Möchte der Fahrer beschleunigen hängt die Aufteilung von der Geschwindigkeit ab.
- Ab 30 km/h wird zur Beschleunigung der Elektromotor eingesetzt.
- Übersteigt die Leistung 40 kW werden beide Motoren eingesetzt.
- Ab 65 km/h kommt der Verbrennungsmotor zum Einsatz.
- Übersteigt die Leistung 50 kW werden beide Motoren eingesetzt.
- Ab einer Geschwindigkeit zwischen 120 und 130 km/h wird der Elektromotor komplett abgeschaltet damit die Batterie nicht zu schnell entlädt.

#### 5.1.4 Bewertung des Systems

Die Technik von Hybridantrieben ist bereits sehr ausgereift, da bereits seit über 10 Jahren Personenkraftwagen mit Hybridantrieb angeboten werden. Vorteile sind ganz klar der niedrige Verbrauch, Nachteile liegen in dem höheren Gewicht, der aufwendigeren Technik und der Anfälligkeit für technische Probleme der zusätzlich verbauten Aggregate.

Die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe, hier vor allem Erdöl zur Gewinnung von Benzin und Diesel, ist zurzeit noch gegeben, allerdings handelt es sich um nicht erneuerbare Energieträger. So kann der Hybridantrieb nur als Weiterentwicklung der bestehenden Otto- und Dieselmotoren gesehen werden.

<sup>118</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:83



Der Kostenunterschied zwischen einem Hybridfahrzeug und einem konventionellem Fahrzeug ist zurzeit noch leider etwas zu groß, sodass die Amortisationsdauer noch zu lange ist. Durch staatliche Förderungen lässt sich die Amortisationsdauer stark senken.

#### 5.1.4.1 SWOT-Analyse der Hybrid-Technologie

<b>Strengths</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringerer Kraftstoffverbrauch als bei konventionellen Antrieben</li> <li>• Verminderter Ausstoß an Emissionen</li> <li>• Geringe Lärmbelastung bei Betrieb mit Elektromotor</li> <li>• Optimale Ausnutzung der Vorteile der einzelnen Motoren</li> <li>• Durch Energierückgewinnung sinkt der Anteil an ungenutzter Energie</li> <li>• Reichweite entspricht konventionellen Personenkraftwagen</li> <li>• Bestehende Versorgungsinfrastruktur kann problemlos genutzt werden</li> </ul>
<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Setzt ebenfalls auf fossile Brennstoffe</li> <li>• Höheres Gewicht durch zusätzlich verbaute Aggregate</li> <li>• Entwicklungsrückstände bei Batterien</li> <li>• Anfälligkeit für technische Gebrechen durch komplizierteren Aufbau</li> <li>• Durch lange Wirkungsgradkette geht Energie verloren</li> <li>• Bis jetzt preislich noch etwas über vergleichbaren konventionellen Alternativen</li> </ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steigende Attraktivität bei steigenden Treibstoffkosten</li> <li>• Weitere Emissions-Reglementierungen können Absatz positiv beeinflussen</li> <li>• Durch Großserienproduktion sinkt der Preis eines einzelnen PKWs</li> </ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probleme mit Batterieleistung und Haltbarkeit werden nicht behoben</li> <li>• Mittelfristig werden weitere alternative Antriebsformen auf den Markt drängen und der Hybrid-Technologie Konkurrenz machen</li> <li>• Europäische Hersteller können den Entwicklungsrückstand gegenüber japanischen Herstellern nicht wettmachen</li> </ul>

#### 5.1.4.2 Versorgungsinfrastruktur

Die bestehende Versorgungsinfrastruktur mit Tankstellen die Benzin- und Dieseltreibstoff anbieten kann nahtlos für Hybridfahrzeuge übernommen werden. Da jedoch bei einer sehr großen Anzahl an zugelassenen Hybridfahrzeugen der Flottenverbrauch sinkt ist anzunehmen, dass einige Tankstellen aufgrund von Umsatzeinbußen aufgegeben werden müssen. In Österreich gab es Ende 2009 2.716 konventionelle Tankstellen.<sup>119</sup>

Auch das Netz an Werkstätten würde von einem Anstieg an Hybridfahrzeugen profitieren. Die kompliziertere verbaute Technik in Kombination mit der erhöhten Fehleranfälligkeit führt zu höheren Service- und Reparaturkosten. Werkstätten würden also zumindest kurzfristig von Hybridautos profitieren.

#### 5.1.4.3 Betriebskosten

Die Anschaffungskosten für einen Hybrid-Personenkraftwagen liegen über denen eines vergleichbaren konventionellen Automobils. Am deutlichsten wird dies am Honda CIVIC der sowohl als Hybrid als auch als Benzin- und Dieselveariante angeboten wird. Die folgende Tabelle stellt diese beiden Automobile gegenüber.

	Honda CIVIC 1.4 i-VTEC	Honda CIVIC HYBRID
<b>Leistung Verbrennungsmotor</b>	73 kW/100 PS	70 kW / 90 PS
<b>Treibstoff</b>	Benzin	Benzin
<b>Leistung Elektromotor</b>	-	15 kW / 20 PS
<b>Reichweite</b>	bis zu 700 km	bis zu 1087 km
<b>Kraftstoffverbrauch (l/100km)</b>	5,9 Liter	4,6 Liter
<b>CO2-Emissionen</b>	135g/km	109g/km
<b>Verkaufspreis</b>	EUR 16.790	EUR 23.990

Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Modellvarianten des Honda Civic<sup>120</sup>

Wie lange muss man mit einem Honda Hybrid fahren bis sich die höheren Anschaffungskosten amortisiert haben? Als Preisgrundlage gelten die Treibstoffpreise vom 05.05.2010.

<sup>119</sup> Vgl. WKO Die Mineralölindustrie. (2010). Tankstellenstatistik 2009. Online abrufbar unter: [http://portal.wko.at/wk/startseite\\_dst.wk?AngID=1&DstID=308](http://portal.wko.at/wk/startseite_dst.wk?AngID=1&DstID=308) (abgerufen am 05.05.2010)

<sup>120</sup> Quelle: [www.honda.at](http://www.honda.at) (abgerufen am 05.05.2010)

Als Jahresfahrleistung werden 15.000 km angenommen. Die folgende Tabelle zeigt die Amortisationsdauer.

	Honda CIVIC 1.4 i-VTEC	Honda CIVIC HYBRID
<b>Kraftstoff</b>	Benzin 95 ROZ	Benzin 95 ROZ
<b>Jahresfahrleistung</b>	15.000	15.000
<b>Verbrauch je 100 km</b>	5,9	4,6
<b>Kraftstoffkosten ja Liter</b>	1,235	1,235
<b>Kraftstoffkosten je 100 km</b>	7,2865	5,681
<b>Kraftstoffkosten ja 1.000 km</b>	72,865	56,81
<b>Kraftstoffkosten pro Jahr</b>	1092,975	852,15
<b>Anschaffungskosten</b>	16.790	23.990
<b>Amortisation nach km</b>		447.000
<b>Amortisation nach Jahren</b>		29,8 Jahre

Tabelle 9: Geschätzte Amortisationsdauer Honda Civic Hybrid<sup>121</sup>

Die vereinfachte Berechnung zeigt, dass es derzeit noch nicht möglich ist einen Hybrid so lange zu fahren, dass er sich im Vergleich zu einem konventionell angetriebenen rentiert. In Japan ist der Toyota Prius Hybrid seit einigen Monaten das meistverkaufte Auto. Dies liegt aber vor allem auch daran, dass dort das Auto aus Prestige Gründen gekauft wird. Weiters wird der Ankauf von Hybridfahrzeugen durch den Staat sehr stark subventioniert.<sup>122</sup> Die Amortisationsdauer kann noch weiter sinken wenn die motorbezogene KFZ-Steuer zu Gunsten einer emissionsbezogenen Steuer aufgegeben wird.

### 5.1.5 Marktchancen

Ein alternativer wird sich schlussendlich immer mit den konventionellen Antrieben messen lassen müssen. Im Fall der bereits auf dem Markt befindlichen Hybride ist dieser Vergleich in Puncto Verbrauch und Reichweite, Beschleunigung und Fahrleistung kein Problem. Einzig die derzeit noch zu hohen Anschaffungskosten und die damit einhergehende lange Amortisationsdauer des Hybridfahrzeuges verhindern derzeit eine noch bessere Marktposition.

<sup>121</sup> Quelle: [www.honda.at](http://www.honda.at) (abgerufen am 05.05.2010), eigene Berechnung

<sup>122</sup> Quelle: <http://futurezone.orf.at/stories/1631226/> (abgerufen am 05.05.2010)

Ob Hybridfahrzeuge wirklich eine Verbesserung in ökologischer Hinsicht darstellen ist noch nicht ganz geklärt. Allerdings ist der thermodynamische Wirkungsgrad bei der richtigen Betriebsstrategie und der passenden Strukturvariante in der Regel höher als bei konventionellen Verbrennungsmotoren.

Da Hybridfahrzeuge, ebenso wie konventionelle Verbrennungsmotoren, auf fossile Energieträger setzen sind die Hybridfahrzeuge kurz- bis mittelfristig als sparsamere Alternative zu reinen Otto- und Dieselmotoren zu betrachten. Mittel- bis langfristig werden andere Alternativen auf den Markt drängen die nicht auf fossile Brennstoffe setzen.

### 5.1.6 Praxisbeispiele

Weltweit gibt es mehr als 30 Hersteller die Hybridfahrzeuge in ihrem Angebot haben. Die weltweite Vorreiterrolle hat seit 1997 Toyota eingenommen, der Toyota Prius wird bereits in der dritten Generation gefertigt. Die folgende Grafik zeigt den neuen Toyota Prius 2010.



Abb. 29: Toyota Prius<sup>123</sup>

Viele Hersteller stellen auf Automessen Konzeptfahrzeuge vor bei denen es noch dauert bis sie in großem Maße auf den Markt kommen. In den USA und vor allem in Japan sind bereits mehr Hersteller mit Hybridfahrzeugen auf dem Markt vertreten. Vor allem in Japan, wo der Toyota Prius und der Honda Insight bereits monatelang die meistverkauften Automobile waren.

<sup>123</sup> Vgl. <http://www.treehugger.com/toyota-new-2010-prius-hybrid-photo-01.jpg> (abgerufen am 26.05.2010)

	Toyota	Honda	Mercedes Benz
Modell	Prius	Civic Hybrid	S-400
Basispreis	25.450 €	23.990 €	73.720 €
Kraftstoffart	Super Bleifrei	Super Bleifrei	Super Bleifrei
Verbrauch außerorts	3,8l/100 km	4,3l/100 km	-
Verbrauch innerorts	4l/100 km	5,2l/100 km	-
Verbrauch kombiniert	4l/100 km	4,6l/100 km	8,1l/100 km
CO2-Emissionen	92g/km	109g/km	191g/km
Abgasnorm	EURO 5	EURO 5	EURO 5
Hubraum in ccm	1789	1339	3498
Verbrennungsmotorleistung	99PS/73kW	90 PS/70kW	280PS/205kW
Elektromotorleistung	60 kW	15 kW	15kW

Tabelle 10: Praxisbeispiele Hybrid<sup>124</sup>, <sup>125</sup>, <sup>126</sup>

### 5.1.7 Zusammenfassung Hybridantrieb

- Hybridfahrzeuge sind bereits seit 1997 auf dem Markt und haben in den letzten 13 Jahren eindeutig ihre Einsetzbarkeit im Alltag bewiesen.
- Zurzeit sind Hybridfahrzeuge im Vergleich zu vergleichbaren konventionell angetriebenen Fahrzeugen noch zu teuer. Nur durch staatliche Förderungen und Steuervergünstigungen werden die Hybridfahrzeuge preislich attraktiv. In Europa werden Hybridfahrzeuge zumeist nur von umweltbewussten Menschen gekauft die den Aufpreis gern in Kauf nehmen.
- Der große Nachteil in Hinblick auf die Zukunftstauglichkeit von Hybridfahrzeugen ist die weiterhin bestehende Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Lediglich der Verbrauch von Benzin und Diesel kann durch den vermehrten Einsatz von Hybridfahrzeugen bis 2030 entscheidend reduziert werden. Als Übergangsvariante zu anderen Technologien, wie zum Beispiel Wasserstoff und Brennstoffzelle,
- Durch zusätzlich verbaute Maschinen wie Elektromotoren, Planetengetriebe und Batterien werden die Fahrzeuge schwerer und anfälliger für technische Defekte.

<sup>124</sup> Vgl. [http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/passengercars/home/new\\_cars/models/s-class/w221/overview/drivetrain\\_chassis.0007.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/s-class/w221/overview/drivetrain_chassis.0007.html) (abgerufen am 12.05.2010)

<sup>125</sup> Vgl. [http://www.toyota.de/cars/new\\_cars/prius/specs.aspx](http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/specs.aspx) (abgerufen am 12.05.2010)

<sup>126</sup> Vgl. [http://www.honda.de/content/automobile/modelle\\_civic\\_hybrid\\_technische\\_daten.php](http://www.honda.de/content/automobile/modelle_civic_hybrid_technische_daten.php) (abgerufen am 12.05.2010)

Für Batterien gibt es noch keine nachhaltigen Entsorgungsmechanismen. Auch die Leistung der Batterien konnte noch nicht entscheidend erhöht werden.

- Eine große Chance für Hybridfahrzeuge liegt in der Entwicklung der steigenden Spritpreise. Durch steigende Preise bei Treibstoff verkürzt sich die Amortisationsdauer der Anschaffung. Durch vermehrte Nachfrage sinkt auch der Preis für ein einzelnes Hybridfahrzeug.

## 5.2 Alternative Kraftstoffe

Als wesentlicher Teil der Übergangsstrategie von Benzin und Diesel zu regenerativen Energieträgern gilt derzeit der Einsatz von alternativen Kraftstoffen wie zum Beispiel Biodiesel, Pflanzenöl, Ethanol und Erdgas. Diese Energieträger können kurz- und mittelfristig einen wichtigen Beitrag dazu leisten, dass die Erdölreserven der Erde geschont werden und so der Umstieg auf andere Technologien wie Wasserstoff, Solarantrieb und die Brennstoffzelle erleichtert wird. Weiters wird durch den Einsatz dieser alternativen Kraftstoffe die Autarkie einzelner Länder im Energiesektor erhöht und Umweltbelastungen durch Schadstoffemissionen werden reduziert. Da auch Flüssiggas und Erdgas zu den fossilen Energieträgern zählen muss deren Einsatz allerdings genau überwacht werden und muss zeitlich befristet sein.

Doch nicht überall wo ‚Bio‘ draufsteht ist auch ‚Bio‘ drin. Der großflächige Anbau von Bioenergiepflanzen kann zu riesigen Monokulturen, zum vermehrten Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden und zur Rodung von Regenwäldern führen. Auch ein wichtiger ethisch-moralischer Aspekt kommt beim Anbau und der Verwendung von Biotreibstoffen zum Tragen: ist es moralisch in Ordnung Millionen Tonnen von Getreide in Form von Bioethanol zu verbrennen wenn große Teile der Welt in Armut und Hunger leben? Hier muss sehr genau auf die gesamte Umwandlungskette geachtet werden!<sup>127</sup> Des Weiteren ist genau zu unterscheiden welcher „Generation“ der Biokraftstoff ist:

- *Erster Generation:*

Bei Biokraftstoffen der ersten Generation werden nur bestimmte Teile der Pflanze verwendet, zum Beispiel Öl, Zucker oder Stärke. Bei diesen Treibstoffen wird viel Energie ungenutzt gelassen, der Wirkungsgrad ist zu niedrig.

- *Zweiter Generation:*

Bei Biotreibstoffen der zweiten Generation wird die gesamte Pflanze verwendet, zum Beispiel bei der Vergärung zu Biogas. Biotreibstoffe der zweiten Generation herzustellen ist technisch schwieriger, weshalb bis jetzt nur Treibstoffe der ersten Generation wirtschaftlich hergestellt werden können.<sup>128</sup>

- *Dritter Generation:*

Der als zukünftig sehr wichtig eingestufte Algentreibstoff, der aus dem Öl der Alge gewonnen wird, wird als Biotreibstoff dritter Generation bezeichnet. Algen produzieren

---

<sup>127</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:13ff

<sup>128</sup> Vgl. Wörgetter, M. (o.J.) Biotreibstoffe der ersten und zweiten Generation – ein technischer Überblick. Wieselburg. S.: 1ff

schneller mehr verwertbare Biomasse, leider kann dieser Treibstoff noch nicht in großer Menge wirtschaftlich erzeugt werden.<sup>129</sup>

### 5.2.1 Diesel-Alternativen

Die folgenden beiden Biokraftstoffe sind ein Ersatz für den klassischen Dieselmotoren.

#### 5.2.1.1 Biodiesel

Biodiesel kann aus Sojaöl, Sonnenblumenöl und zumeist aus Rapsöl hergestellt. Die Herstellung und Qualitätssicherung unterliegt seit Oktober 2003 einer EU-Norm. Biodiesel verfügt über eine sehr gute Schmiereigenschaft, was auf den chemischen Aufbau und den hohen Sauerstoffgehalt zurückzuführen ist (11%). Dadurch reduziert sich der Verschleiß am Motor und in der Einspritzpumpe. Die Beimengungspflicht von Biodiesel zu traditionellem Diesel in Österreich unterstützt so auch die Schmiereigenschaften des Treibstoffes. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Eigenschaften von Biodiesel.

	Biodiesel
<b>Aggregatzustand</b>	flüssig
<b>Kinematische Viskosität</b>	7,5mm <sup>2</sup> /s
<b>Dichte</b>	0,86-0,90kg/l
<b>Energiedichte</b>	8,9kWh/l
<b>Cetan<sup>130</sup>-Zahl</b>	51-58
<b>Flammpunkt</b>	120-135 °C
<b>Schmelzpunkt</b>	-12 bis -22°C
<b>Kraftstoffäquivalent zu Diesel</b>	0,91l

Tabelle 11: Eigenschaften von Biodiesel<sup>131</sup>

Biodiesel weist viele Vorteile gegenüber den traditionellen Energieträgern Benzin und Diesel auf:

<sup>129</sup> Vgl. <http://blog.atonline.de/2008/07/28/algen-biokraftstoffe-der-dritten-generation/> (abgerufen am 24.05.2010)

<sup>130</sup> Die Cetanzahl beschreibt die Zündwilligkeit von Dieselmotoren. Je mehr unverzweigte Kohlenwasserstoffmoleküle prozentual im Kraftstoff enthalten sind, desto leichter entzündet er sich.

<sup>131</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:63, eigene Darstellung



- Biodiesel verfügt über einen höheren Energiegehalt als Benzin.
- Biodiesel ist fast Schwefelfrei und enthält keine Aromate und Benzol.
- Biodiesel besitzt gute Schmiereigenschaften.
- Biodiesel wird aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen.
- Biodiesel ist biologisch abbaubar und kein Gefahrgut.
- Biodiesel gibt bei der Verbrennung etwa so viel Kohlenstoff frei wie die Pflanze beim Wachstum aufgenommen hat.

Biodiesel hat allerdings nicht nur Vorteile sondern leider auch Nachteile:

- Biodiesel wirkt wie ein Lösungsmittel und greift Lacke und Motoröl an.
- Biodiesel weist einen geringfügig niedrigeren Energiegehalt als Diesel auf.
- Biodiesel kann durch Ablagerungen (Glyzerin) der Einspritzpumpe und dem Kraftstofffilter zusetzen.
- Biodiesel benötigt zur Herstellung (Umesterung) Methanol welches aus fossilen Energieträgern hergestellt wird.

Biodiesel wird in erster Linie aus Raps hergestellt. Rapssamen enthalten circa 40 – 45% Öl. Nach dem Pressen werden unerwünschte Begleitstoffe ausgefiltert. Durch die Zugabe von Methanol und eines Katalysators (Natronlauge) wird die Viskosität angepasst. Aus einer Tonne Rapssaat können circa 375 kg Rapsöl gewonnen werden. Durch Zugabe von 45 kg Methanol werden 430 kg Biodiesel gewonnen.

Beim Umstieg von traditionellem Dieselkraftstoff auf Biodiesel sind nur wenige Adaptionen am Fahrzeug durchzuführen. Da Biodiesel eine höhere Lösefähigkeit besitzt sollten Dichtungen und Schläuche gegebenenfalls ersetzt werden.<sup>132, 133</sup> Der Preis von Biodiesel liegt in Österreich derzeit bei circa 0,96 € je Liter.<sup>134</sup>

### 5.2.1.2 Pflanzenöl

Pflanzenöl als Energieträger für Dieselmotoren kann aus verschiedenen Pflanzen gewonnen werden, wie etwa aus Sonnenblumen, Raps und Palmen. Reines Pflanzenöl findet derzeit vor allem im gewerblichen Schwerlastverkehr Anwendung. Pflanzenöl ist ein reines Naturprodukt, was sich negativ auf die Lagerungsfähigkeit auswirkt. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff reagiert mit einzelnen Komponenten des Öls und bewirkt so Umwandlungsprozesse. Die Dauer der Lagerung ist in den meisten Fällen auf 6 bis 12 Monate begrenzt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Eigenschaften von verschiedenen Pflanzenölen.

<sup>132</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:62ff

<sup>133</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:29ff

<sup>134</sup> Vgl. <http://www.oeamtc.at/sprit/> (abgerufen am 12.05.2010)

	Rapsöl	Sonnenblumenöl	Palmöl
<b>Aggregatzustand</b>	flüssig	flüssig	flüssig
<b>Kinematische Viskosität</b>	72,3 mm <sup>2</sup> /s	68,9 mm <sup>2</sup> /s	29,4 mm <sup>2</sup> /s
<b>Dichte</b>	0,92 kg/l	0,93 kg/l	0,92 kg/l
<b>Heizwert</b>	37,6 MJ/kg	37,1 MJ/kg	37 MJ/kg
<b>Cetan-Zahl</b>	40	36	42
<b>Flammpunkt</b>	317 °C	316°C	267°C
<b>Stockpunkt</b>	-3 bis 0 °C	-18 bis -16°C	27 bis 43°C
<b>Kraftstoffäquivalent zu Diesel</b>	0,96l	0,96l	0,96l

Tabelle 12: Eigenschaften von Pflanzenölen<sup>135</sup>

Die Herstellung von Pflanzenöl erfolgt unter demselben Muster wie die Herstellung von Biodiesel, allerdings unterbleibt die Umesterung mit Methanol, was sich positiv auf die Energiebilanz auswirkt. Pflanzenöl bildet die kostengünstigste Kraftstoffalternative für den Betrieb von Autos, allerdings muss auch hier das Automobil zuerst umgerüstet werden. Beim Eintank-System, das vor allem für ältere Motorenmodelle geeignet ist sind die Umbauten einfacher und kostengünstiger. Durch den hohen Sauerstoffanteil im Pflanzenöl wird der Motor geschont, die Entzündung des Treibstoffes erfolgt bei niedrigerem Druck und niedrigerer Temperatur, was den Motor schont. Auch die Ölwechselintervalle werden durch den Einsatz von Pflanzenöl erhöht. Beim Eintank-System ist bei kälteren Temperaturen mit Problemen zu rechnen, da Pflanzenöl bei Temperaturen um den Gefrierpunkt zähflüssig wird. Für diesen Fall sind technische Vorkehrungen wie Tauchsieder im Tank oder lange Vorwärmzeiten zu treffen. Beim Zweitank-System verfügt das Automobil über einen kompletten zweiten Kraftstoffstrang. So werden die schlechten Kaltstarteigenschaften von Pflanzenöl umgangen da stets mit konventionellem Dieseltreibstoff gestartet wird. Wenn die Betriebstemperatur erreicht ist wird auf Pflanzenöl umgeschaltet. Dieser Umbau ist allerdings teurer als das Eintank-System.

Da Pflanzenöl im Gegensatz zu Biodiesel nicht chemisch behandelt wird fällt die Energiebilanz besser aus. Die Umwelt wird bei Pflanzenöl nur durch die Düngemittel, den Erntevorgang und die Pressung belastet. Das klingt immer noch nach viel, ist aber von allen alternativen Dieseltreibstoffen die umweltfreundlichste Variante.<sup>136, 137</sup>

Ein Liter Pflanzenöl kostet an österreichischen Tankstellen derzeit circa 0,80 € je Liter.<sup>138</sup>

<sup>135</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:74, eigene Darstellung

<sup>136</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:74ff

<sup>137</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 218ff

<sup>138</sup> Vgl. <http://www.oeamtc.at/a1118744/> (abgerufen am 12.05.2010)

## 5.2.2 Benzin Alternativen

Die folgenden beiden Biokraftstoffe sind ein Ersatz für den klassischen Benzinkraftstoff in Ottomotoren.

### 5.2.2.1 Bio-Ethanol

Obwohl Ethanol bereits zu Beginn der Automobilära vor über 100 Jahren als Kraftstoff eingesetzt wurde hat dieser Kraftstoff bis heute den Weg zu den Kunden nur in kleinem Ausmaß gefunden, ist aber dennoch der weltweit weitverbreitetste Biokraftstoff<sup>139</sup>. Ethanol kann aus verschiedensten Ausgangsprodukten hergestellt werden, etwa Getreide, Zuckerrüben, Kartoffeln, Holz und sonstiger Biomasse. Durch alkoholische Gärung werden bei der chemischen Umwandlung aus der Glucose die Rohstoffe Ethanol und Kohlendioxid. Die Herstellung von Ethanol als Energieträger für Personenkraftwagen wird vor allem in Nord – und Südamerika vorangetrieben, wo circa 76% der weltweiten Produktion stattfinden<sup>140</sup>. Dem Ethanol an der Tankstelle werden zumeist 15% Benzin beigemischt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Eigenschaften von Bio-Ethanol.

	Bio-Ethanol
<b>Dichte</b>	0,79kg/l
<b>Heizwert</b>	26,8 MJ/kg
<b>Kinematische Viskosität</b>	1,5mm <sup>2</sup> /s
<b>Oktanzahl</b>	>100
<b>Flammpunkt</b>	< 21°C
<b>Kraftstoffäquivalent</b>	0,65l

Tabelle 13: Eigenschaften von Bio-Ethanol<sup>141</sup>

In vielen Ländern gehören ethanolbetriebene Fahrzeuge zum Alltag. In Brasilien waren 2006 mehr als 80% der neu zugelassenen Fahrzeuge mit Flex-Fuel-Motoren ausgestattet. Bei diesen Motoren kann man zwischen Ethanol und Benzin wählen, egal in welcher Mischung. Bei der Verwendung muss ein höherer Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu Superbenzin eingerechnet werden (1,54:1). Dem gegenüber stehen allerdings die höhere

<sup>139</sup> Vgl. Wissenschaftliche Tagung des Dachverbandes Agrarforschung e.V. und des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2006). Biodiesel, Pflanzenöl, Ethanol - Bestandsaufnahme und ökonomische Perspektiven in Deutschland. Braunschweig, 26. Oktober 2006. S.: 5ff

<sup>140</sup> Vgl. Wissenschaftliche Tagung des Dachverbandes Agrarforschung e.V. und des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2006). Biodiesel, Pflanzenöl, Ethanol - Bestandsaufnahme und ökonomische Perspektiven in Deutschland. Braunschweig, 26. Oktober 2006. S.: 5ff

<sup>141</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:84, eigene Darstellung

Leistung und der in vielen Ländern steuerbegünstigte oder steuerbefreite Treibstoff. Durch die hohe Oktanzahl von Bioethanol wird die Klopfestigkeit des Motors gesteigert, so sind Wirkungsgradgewinne von bis zu 20% möglich.

Die Umweltbilanz von Bioethanol ist besser als bei Benzin, da nur so viel Kohlendioxid ausgestoßen wird als zuvor beim Wachstum der Pflanze gebunden wurde. Vernachlässigt werden dabei allerdings das Düngen, das Ernten und die Verarbeitung, wobei fossile Energieträger verbraucht werden. Bei den gesetzlich limitierten Schadstoffen emittieren Ethanol-Fahrzeuge im Vergleich zu Benzin-Fahrzeugen weniger Kohlenwasserstoffe, weniger Kohlenmonoxide und weniger Benzol.<sup>142, 143</sup>

Der Preis für einen Liter Ethanol beträgt bei österreichischen Tankstellen derzeit zwischen 0,929 und 1,069 € je Liter.<sup>144</sup>

### 5.2.2.2 Biogas

Biogas, auch bekannt unter den Namen Biomethan, GreenGas, Bioerdgas und BNG, besteht in der Regel aus 50 bis 74% Methan, aus 25 bis 49% Kohlendioxid sowie aus Wasserdampf, Ammoniak, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff und weist einen Heizwert von 5,5 bis 6,25 kWh/m<sup>3</sup>. Biogas wird gewonnen aus Stroh, Gras, Gülle, sowie aus organischen Abfällen aus Großküchen und Haushalten. Diese organischen Reststoffe werden unter Luftabschluss mit Hilfe von anaeroben Mikroorganismen zu Biogas verarbeitet. Biogas findet vor allem über Umwege Einzug in die Automobilbranche. Das Biogas, das auf Grund seiner hohen Klopfestigkeit sehr gut für die Verbrennung in Ottomotoren geeignet ist, wird zumeist als Beimengung zum Erdgas verwendet.

### 5.2.2.3 Flüssiggas (LPG)

LPG (Liquefied Petroleum Gas), auch als Autogas bekannt, zählt in einigen Nationen bereits zum Alltag auf den Straßen. In Italien, Polen, den Niederlanden und der Türkei sind bereits hunderttausende LPG-betriebene Fahrzeuge auf dem Markt. B

Autogas besteht aus leicht verflüssigbaren Kohlenwasserstoffverbindungen (C<sub>m</sub>H<sub>m</sub>) mit drei oder vier Kohlenstoffatomen. Die Hauptbestandteile von Flüssiggas sind:

- Propan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

<sup>142</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:84ff

<sup>143</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 189ff

<sup>144</sup> Vgl.

<http://www.oeamtc.at/sprit/?state=&fuelType=10&daysLimit=1&ZIP=&spritaction=doSimpleSearch&search=Anzeigen> (abgerufen am 12.05.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Propen (Propylen)  $C_3H_6$
- Butan  $C_4H_{10}$
- Buten (Butylen)  $C_4H_8$

LPG ist im Normalzustand ein gasförmiges Brenngas, das unter Druck verflüssigt wird. Im flüssigen Zustand besitzt es nur 1/260tel seines gasförmigen Volumens. Das Flüssiggas, das in seinem Urzustand geruchs- und farblos ist, wird für die Verwendung in Automobilen odorisiert um Leckagen besser zu erkennen. Die folgende Tabelle zeigt wichtige Eigenschaften von LPG.

	LPG (Flüssiggas)
<b>Dichte</b>	2,023 kg/m <sup>3</sup>
<b>Relative Dichte</b> (bezogen auf trockene Luft)	1,565
<b>Brennwert</b>	28,3 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Heizwert</b>	26 kWh/m <sup>3</sup>

Tabelle 14: Eigenschaften von LPG<sup>145</sup>

Autogas unterscheidet sich in den Eigenschaften, bis auf die Dichte, kaum von Benzin: Heizwert, Luftbedarf, Gemischheizwert und Oktanzahl bleiben im selben Wertebereich. LPG wird bei der Förderung von Erdgas und Rohöl gewonnen und entsteht bei der Weiterverarbeitung von Öl in Raffinerien. Autogas lässt sich beliebig lang lagern und wird schon lange im Verkehrssektor eingesetzt, etwa bei Gabelstaplern die auch in geschlossenen Räumen operieren müssen. Autogas ist sehr schadstoffarm.

Die wesentlichen Merkmale von LPG gegenüber Benzin und Diesel sind:

Positiv:

- LPG hat niedrigere Treibstoffkosten
- Problemloser Einbau in Fahrzeuge mit Ottomotor
- Reduzierter Schadstoffausstoß
- Leiserer betrieb
- Hohe Klopfestigkeit wegen hoher Oktanzahl (ROZ:104)
- Verlängerte Motorlebensdauer
- Sehr hohe Reichweiten bei bivalentem Betrieb
- Problemloser Kraftstoffwechsel während der Fahrt

Negativ:

- Geringe, aber ständig wachsende Versorgungsdichte
- Nachrüstkosten von bis zu 3000€

<sup>145</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:93, eigene Darstellung

- Bedingt durch Tankeinbau drohen Platzeinbußen
- Unterschiedliche Tankstutzen im Ausland<sup>146</sup>

Flüssiggas hat viele Vorteile gegenüber Benzin, so zum Beispiel auch eine Verringerung diverser Emissionen, wie folgende Tabelle zeigt:

Substanz	Verringerung um
Stickstoffoxide	80%
Kohlenwasserstoffe	60%
Kohlenmonoxid	80%
Schwefeldioxid, Partikel	100%
Geräusche	50%
Smog-Verursacher	80%
Treibhausgase	20%
Gerüche, Verdampfungen	100%

Tabelle 15: Umweltvorteile von LPG gegenüber Benzin<sup>147</sup>

LPG ist für den Betrieb in normalen Ottomotoren nicht nachteilig. Nur bei Fahrzeugen mit Benzindirekteinspritzung ergeben sich Probleme das LPG bei Ottomotoren für eine äußere Gemischbildung konzipiert ist. LPG wird an Bord in flüssiger Form gespeichert. Für den Einsatz im Ottomotor wird es zunächst von einem Verdampfer in den gasförmigen Aggregatzustand übergeführt und in den Zylinderraum eingeblasen. Flüssiggas verbindet sich im Zylinderraum sehr gut mit der Luft und verfügt so über eine weichere Verbrennung als Benzin. Dies wirkt sich positiv auf die Motorlebensdauer aus und bewirkt zudem einen leiseren Betrieb des Motors. Zu einer Entzündung im Motorraum kommt es wenn:

- ausreichend Sauerstoff vorhanden ist
- das richtige Mischungsverhältnis vorliegt
- die nötige Zündenergie (z.B.: Zündfunke) zugeführt wird.

Der Preis für einen Liter LPG beträgt in Österreich und Deutschland derzeit circa 0,64 €<sup>148</sup>. Die Speicherung von LPG an Bord des Fahrzeuges findet in einem Tank statt. Auf Grund des relativ geringen Drucks (bis zu 10bar) kann die Tankform sehr flexibel gestaltet werden.

<sup>146</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:98

<sup>147</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:117, eigene Darstellung

<sup>148</sup> Vgl. <http://www.gas-tankstellen.de/menu.php?jump=preise> (abgerufen am 21.05.2010)

Die Umrüstung von normalen Fahrzeugen von Benzin auf LPG ist technisch simpel. Der Motor bleibt unverändert, nur ein Verdampfer führt das LPG in einen gasförmigen Zustand über. Die Umrüstkosten amortisieren sich durchschnittlich nach 2 bis 5 Jahren. Besonders wirtschaftlich sind LPG-Fahrzeuge bei hohen jährlichen Fahrleistungen zum Beispiel bei Taxiunternehmen und Firmenfahrzeugen.

Bei Fahrzeugen die mit Gasen betrieben werden herrschen bei der Bevölkerung traditionell große Bedenken in Hinsicht auf die Explosionsgefahr. Wie zahlreiche Unfallsimulationen und Brandsimulationen zeigten sind die derzeit verfügbaren Systeme sicher in ihrer Anwendung. Auch das Parkverbot von gasbetriebenen Fahrzeugen in Tiefgaragen ist in beinahe allen deutschen und österreichischen Bundesländern bereits aufgehoben.<sup>149, 150, 151</sup>

### 5.2.2.4 Erdgas (CNG)

Das Erdgas, ein endlicher fossiler Rohstoff, hat im Gegensatz zu Benzin einige nicht außer Acht zu lassende Vorteile. Der zeitliche Rahmen der Verfügbarkeit wird höher angesetzt und es verursacht bei der Verbrennung deutlich weniger Schadstoffe. Somit kann es auf dem PKW-Sektor als Übergangsprodukt angesehen werden für die Abkehr von fossilen Energieträgern. Des Weiteren können mit dieser Technik gesammelte Erfahrungen für spätere Energieträger wie gasförmigen Wasserstoff genutzt werden.

Erdgas besteht aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und wird im Fahrzeugsektor in der Regel unter Druck gespeichert (CNG – Compressed Natural Gas).

Die wesentlichsten Vorteile von CNG im Fahrzeugbetrieb sind die geringen Kraftstoffkosten und der verminderte Ausstoß an Schadstoffen. Ein Liter CNG kostet in Österreich derzeit zwischen 0,867 und 1,140 € je Liter.<sup>152</sup> Ein wichtiger Negativpunkt bei CNG-betriebenen Automobilen ist die relativ geringe Reichweite von bis zu 450 km, die sich allerdings durch bivalente Treibstofftechnik, also einen zusätzlichen Benzintank, sehr stark erhöhen lässt.

Der gasförmige Kraftstoff Erdgas vermischt sich im Zylinderraum sehr gut mit der Luft und sorgt für eine sehr weiche Verbrennung, der Motor wird geschont und er läuft leiser. Die Speichersysteme für Erdgasfahrzeuge weisen eine sehr niedrige Energiedichte auf, weswegen in den Erdgastanks ein sehr hoher Druck herrscht (200 bis 350 bar). Dementspre-

<sup>149</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:101ff

<sup>150</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 186ff

<sup>151</sup> Vgl. [http://www.maxi-gas.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=48&Itemid=91](http://www.maxi-gas.de/index.php?option=com_content&task=view&id=48&Itemid=91) (abgerufen am 21.05.2010)

<sup>152</sup> Vgl.

<http://www.oeamtc.at/sprit/?state=&fuelType=9&daysLimit=1&ZIP=&spritaction=doSimpleSearch&search=Anzeigen> (abgerufen am 12.05.2010)

chend groß und schwer sind die Tanks, befindet sich der Tank im Kofferraum müssen Ladevolumendefizite in Kauf genommen werden. Die wesentlichen Vor- und Nachteilen entsprechen der Auflistung in Kapitel 8.3.2.3. Der hohe benötigte Druck in den Tanks setzt sich bei den Tankstellen fort. Für den Bau einer Erdgastankstelle sind wegen des hohen Druckniveaus relativ hohe Investitionskosten zu tätigen, dies ist auch ein Grund wieso bis jetzt noch relativ wenige Erdgastankstellen den Markt bedienen.<sup>153, 154</sup>

Ein entscheidender Vorteil sind die sehr geringen Treibstoffkosten und die reduzierten Emissionen, wie folgende Tabelle zeigt.

Substanz	Verringerung geg. Diesel um	Verringerung geg. Benzin um
Stickoxid	80%	20%
Kohlenwasserstoffe	80%	80%
Kohlenmonoxid	50%	75%
Kohlendioxid	bis zu 13%	bis zu 35%
Schwefeldioxid, Partikel	bis zu 99%	-
weitere Reduktionen	Aldehyde	Aldehyde, BTX-Aromate
	keine Verdampfungsverluste	keine Verdampfungsverluste
	keine Geruchsbelästigung	keine Geruchsbelästigung

Tabelle 16: Schadstoffreduzierung beim Einsatz von CNG<sup>155</sup>

## 5.2.5 Bewertung der Systeme

### 5.2.5.1 SWOT-Analyse der alternativen Kraftstoffe

Strengths
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Großteil der Technologie der Otto- und Dieselmotoren kann übernommen werden</li> <li>• Die alternativen Kraftstoffe bestehen teilweise (Biogas, Bioethanol, Methanol) aus regenerativen Ausgangsstoffen                         <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steuerliche Begünstigungen sorgen für niedrige Treibstoffpreise</li> <li>• Staatliche Förderungen für den Erwerb eines PKW der mit alternativen Kraftstoffen</li> </ul> </li> </ul>

<sup>153</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 175ff

<sup>154</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:117ff

<sup>155</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:131, eigene Darstellung



<p>betrieben wird</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Geringerer Schadstoffausstoß</li><li>• Geringerer Geräuschpegel</li><li>• Höhere Motorlebensdauer, geringerer Schmierölverbrauch</li><li>• Keine Verdampfungsemissionen</li></ul>
<p style="text-align: center;"><b>Weaknesses</b></p>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Erdgas und LPG werden aus fossilen Energieträgern gewonnen</li><li>• Die Errichtung von Gastankstellen ist auf Grund der hohen Druckverhältnisse in den Tanks kostenaufwendig</li><li>• Einfahrverbot in Tiefgaragen wegen Explosionsgefahr</li><li>• Relativ geringe Reichweite bei monovalentem Antrieb</li><li>• Schwach ausgebaute Versorgungsinfrastruktur</li><li>• Zur Zeit noch ineffiziente Herstellungsmethoden vor allem bei Biokraftstoffen</li><li>• Die Umrüstung kann bis zu 4500€ kosten</li><li>• Verlust von Stauraum durch Einbau des schweren Tanks</li><li>• Zusätzlich verbaute Aggregate bedeuten Gewichtszuwachs und erhöhtes Risiko für technische Gebrechen</li><li>• „Verschwendung „ von Lebensmitteln für Treibstoff</li><li>• Der Tank-Vorgang bei Gasen unterscheidet sich von herkömmlichen Tanken von Benzin oder Diesel</li><li>• Es gibt keine einheitliche Norme bei Tank- und Zapfanschlüssen bei Gasen</li></ul>
<p style="text-align: center;"><b>Opportunities</b></p>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Für alternative Kraftstoffe entwickelte Technologien sind bilden die Basis für zukünftige Systeme (Wasserstoff,...)</li><li>• Durch stetig steigende Diesel- und Benzinpreise sinkt die Amortisationsdauer für die Umrüstung</li><li>• Bei steigender Nachfrage werden mehr PKW-Anbieter mehr Modelle im Angebot haben</li><li>• Viele alternative Kraftstoffe werden als Übergangslösung zur Brennstoffzelle und zum Wasserstoff angesehen</li></ul>
<p style="text-align: center;"><b>Threats</b></p>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Vorurteile über die Gefährlichkeit von Gasen können bei der Bevölkerung nicht abgebaut werden und verhindern einen Marktdurchbruch</li><li>• Umrüstung muss angemeldet und typisiert werden</li><li>• Unter Umständen droht der Verlust von Garantieansprüchen beim Hersteller des Personenkraftwagens</li></ul>

### 5.2.5.2 Versorgungsinfrastruktur

Das Angebot an Biodiesel ist bei den österreichischen Tankstellen bereits sehr gut ausgebaut. An sehr vielen Tankstellen kann man bereits Biodiesel tanken. Die Tankstellen müssen für Biodiesel auch nicht umgerüstet werden, lediglich Dichtungen und Schläuche müssen wegen anderer chemischer Zusammensetzung adaptiert werden. Der Preis für einen Liter Biodiesel liegt geringfügig unter dem Preis von normalem Diesel. Der Preis beträgt an allen Tankstellen in Österreich durchschnittlich 0,96€ je Liter.

Das Angebot an Pflanzenöl-Tankstellen in Österreich ist noch sehr übersichtlich. Je nach Quelle sind bis zu 22 Tankstellen in Österreich verzeichnet.<sup>156</sup> Auch hier sind die Umrüstmaßnahmen für die Tankstellenbetreiber nicht zu teuer, allein die zu geringe Nachfrage verhindert ein dichteres Tankstellennetz. Der Preis von einem Liter Pflanzenöl beträgt derzeit in Österreich circa 0,80 € je Liter.

Erdgas findet man bereits in zahlreichen Tankstellen in Österreich. Derzeit gibt es in Österreich 167 CNG Tankstellen<sup>157</sup>. Das Versorgungsnetz ist allerdings noch lange nicht lückenlos geschlossen. Vor allem in Kärnten, der Steiermark und Niederösterreich befinden sich noch zahlreiche weiße Flecken auf der Karte. Des Weiteren gibt es noch keine einheitliche Norm bei Tankanschlüssen an Tankstellen.<sup>158</sup>

Der Betrieb von gasbetriebenen Fahrzeugen ist allerdings weitaus sinnvoller wenn man zu Hause über eine eigene Tankanlage verfügt.

### 5.2.5.3 Rechtliche Aspekte

In Österreich genauso wie in Deutschland wurden die Bestimmungen zum Parken von gasbetriebenen Fahrzeugen in Parkhäusern und Tiefgaragen bereits aufgehoben oder zumindest adaptiert.

In Wien, dem Bundesland mit den meisten Parkhäusern und Tiefgaragen in Österreich ist das Parken in Garagen und Parkhäusern durch das Wiener Garagengesetz 2008 geregelt.

Bei Anlagen zum Einstellen von mit Flüssiggas, welches schwerer ist als Luft, betriebenen Kraftfahrzeugen ist zur Erteilung einer Bewilligung das Gutachten eines Sachverständigen nachzuweisen, dass das spezifische Gefährdungspotential derart betriebener Kraftfahr-

<sup>156</sup> Vgl. <http://www.mapexplorer.com/v3/plus/raiffeisen-leasing/?tnr=3&mnr=1#> (abgerufen am 12.05.2010)

<sup>157</sup> Vgl. <http://www.erdgasautos.at/tanken/cngt> (abgerufen am 12.05.2010)

<sup>158</sup> Lindner D. (2008) Alternative Kraftstoffe. Frankfurt: August von Goethe Literaturverlag. S.: 63ff

zeuge durch geeignete Maßnahmen wirksam unterbunden wird. In Garagen unterhalb von Aufenthaltsräumen ist das Einstellen von mit Flüssiggas betriebenen Kraftfahrzeugen unzulässig.

Bei bestehenden Garagen ist das Einstellen von mit Erdgas betriebenen Kraftfahrzeugen dann zulässig, wenn durch eine ausreichende Lüftung sichergestellt ist, dass durch austretendes Gas keine Gefährdung für das Leben oder die Gesundheit von Personen entsteht.<sup>159</sup>

### 5.2.5.4 Verfügbarkeit der Rohstoffe

Alternative Kraftstoffe können sowohl erneuerbar als auch fossiler Natur sein. Die fossilen alternativen Energieträger wie Erdgas und Flüssiggas sind nur begrenzt auf der Erde vorhanden und teilen somit das gleiche Schicksal wie das Erdöl.

Erdgas ist mit einem Anteil von knapp 24 Prozent am Welt-Primärenergieverbrauch der dritt wichtigste Energieträger hinter Erdöl und Kohle. Dabei weist Erdgas in den letzten Jahren hohe Steigerungsraten auf. Dieser Trend dürfte sich auch in Zukunft fortsetzen. 2008 erreichte der Erdgasverbrauch mit etwa 3,1 Billionen Kubikmetern einen neuen Höchststand.

Ähnlich wie beim Erdöl sind die Reserven sehr stark konzentriert. Auf drei Länder: Russland, Iran und Katar – entfallen über die Hälfte der weltweiten Erdgasreserven. Mit den derzeit bekannten Reserven bei gleichmäßig verlaufender Nachfragekurve reicht das Erdgas noch circa 64 Jahre.<sup>160 161</sup>

Andere alternative Kraftstoffe werden aus nachwachsenden Stoffen wie Raps, Soja, Palmen und Sonnenblumen gewonnen. Deren Anbau ist zeitlich nicht begrenzt.

### 5.2.5.5 Betriebskosten

In diesem Kapitel werden die Betriebskosten der einzelnen alternativen Kraftstoffe an Hand von am Markt erhältlichen Fahrzeugen anschaulich dargestellt. Bei einigen Preisvergleichen in der folgenden Tabelle handelt es sich allerdings um persönliche Berichte von Personen, die ihre Autos umgerüstet haben, da zum Beispiel eine Umrüstung auf

<sup>159</sup> Vgl.

[http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrW&Dokumentnummer=LRWI\\_B100\\_000&ResultFunctionTocken=4b1993de-97d7-4b48-9bcd-39192cc62442&Titel=&Typ=&Index=&ImRisSeit=Undefined&ResultPageSize=50&Suchworte=garage](http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrW&Dokumentnummer=LRWI_B100_000&ResultFunctionTocken=4b1993de-97d7-4b48-9bcd-39192cc62442&Titel=&Typ=&Index=&ImRisSeit=Undefined&ResultPageSize=50&Suchworte=garage) (abgerufen am 21.05.2010)

<sup>160</sup> Vgl. [http://www.bgr.bund.de/nr\\_322848/DE/Themen/Energie/Erdgas/erdgas\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.bgr.bund.de/nr_322848/DE/Themen/Energie/Erdgas/erdgas_node.html?__nnn=true) (abgerufen am 21.05.2010)

<sup>161</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 5

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Pflanzenöl und auch andere Umrüstungen beinahe nur von Einzelfirmen und nicht ab Werk beim Hersteller durchgeführt werden.

<b>Kraftstoff</b>	<b>CNG (Erdgas)</b>	<b>LPG</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Ethanol</b>	<b>Pflanzenöl</b>
<b>Preis je Liter</b>	0,87 €	0,64 €	0,99 €	0,95 €	0,90 €
<b>Modell</b>	Mercedes B 170 NGT	Ford Maverick 2.0 XLT	Dacia Logan	Ford Focus FFV	Nissan Patrol Gr
<b>Kaufpreis</b>	ca. 29.000€	Umrüstung ca. 2.500€	Umrüstung ca. 3.000€	18.000 €	Umrüstung ca. 1.000€
<b>Verbrauch</b>	5,3l/100km	12l/100km	6,5l/100km	10,2l/100km	10,8l/100km
<b>Reichweite</b>	300 km	790 km	1.300 km	530 km	850 km
<b>Tankvolumen</b>	16 Liter	95 Liter	50 Liter	55 Liter	95 Liter
<b>CO2-Ausstoß</b>	135g/km	-	97g/km	-	-
<b>Kosten "Volltanken"</b>	€ 13,92	€ 60,80	€ 49,50	€ 52,25	€ 85,50
<b>Kosten 100 km</b>	€ <b>4,64</b>	€ <b>7,68</b>	€ <b>6,44</b>	€ <b>9,69</b>	€ <b>9,72</b>
<b>Verbrauch Benzin/Diesel</b>	7,5l/100km	11l/100km	7,8l/100km	8,3l/100km	11l/100km
<b>Preis Benzin/Diesel je Liter</b>	€ 1,19	€ 1,12	€ 1,19	€ 1,19	€ 1,12
<b>Kosten 100 km</b>	€ <b>8,93</b>	€ <b>12,32</b>	€ <b>9,28</b>	€ <b>9,88</b>	€ <b>12,32</b>

Abb. 30: Vergleich alternativer Kraftstoffe

### 5.2.6 Praxisbeispiele

Es gibt eine Vielzahl von Firmen die herkömmliche Dieselmotoren auf den Betrieb mit Biodiesel und Pflanzenöl umrüsten die hier nicht alle aufgezählt werden können<sup>162</sup>. Praxisbeispiele im eigentlichen Sinn dieser Diplomarbeit können hier nicht angeführt werden da die Technologie von herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren nur etwas adaptiert wird. Dies trifft vor allem auf mit Biodiesel und Pflanzenöl betriebene Autos zu.

<sup>162</sup> <http://www.gasauto.info/> (abgerufen am 21.05.2010)

Direkt ab Werk kann man erdgasbetriebene Personenkraftwagen derzeit von Fiat, Ford, Mercedes-Benz, Opel Peugeot und Volkswagen beziehen.<sup>163</sup> Auch hier werden technische Umrüstungen an bestehenden herkömmlichen Fahrzeugen von vielen Firmen angeboten.

Mit LPG betriebene Personenkraftwagen werden von einer Vielzahl namhafte Hersteller direkt ab Werk angeboten, darunter Citroën, Fiat, Ford, Opel, Volvo, Peugeot und Renault<sup>164</sup>. Die Umrüstung auf die LPG-Technologie wird auch hier von zahlreichen Firmen angeboten.

Mit Ethanol betriebene Fahrzeuge sind derzeit auf dem heimischen Markt von Ford und Saab erhältlich. Auch hier, wie bei allen anderen alternativen Kraftstoffen, werden Umrüstungspakete von sehr vielen Firmen angeboten<sup>165</sup>.

### 5.2.7 Zusammenfassung Alternative Kraftstoffe

- Der Betrieb von Otto- und Dieselmotoren mit alternativen Kraftstoffen ist technisch ausgereift und marktfähig. In einigen Ländern sind alternative Kraftstoffe bereits in großem Ausmaß Teil der automobilen Gegenwart.
- Allerdings sind nicht alle Motoren gleich gut für einen Umbau geeignet, hierfür bieten sich vor allem ältere Motoren an.
- Ein derzeit bestehendes Problem ist die Herstellung von alternativen Kraftstoffen. Sie ist zuweilen nicht wirtschaftlich genug, oder es bleiben große Energiereserven ungenutzt wie bei Treibstoffen der ersten Generation. Biotreibstoffe der zweiten und dritten Generation sind theoretisch wirtschaftlich effizienter können allerdings zurzeit nicht wirtschaftlich rentabel hergestellt werden. Der Preis für alternative Kraftstoffe wird durch Steuerbegünstigungen niedrig gehalten.
- Einige bieten auch eine langfristig vernünftige Alternative gegenüber fossilen Brennstoffen.
- Bei der Produktion und der Verwendung von nachhaltigen Biokraftstoffen muss penibel darauf geachtet werden diese nicht auf Kosten der hungerleidenden Menschen zu produzieren. Ein moralisch-ethischer Zweifel bleibt bei vielen Menschen allerdings bestehen.

---

<sup>163</sup> Vgl. <http://www.erdgasautos.at/fahrzeuge/> (abgerufen am 21.05.2010)

<sup>164</sup> Vgl. <http://www.propan.de/fahrzeuge/fahrzeuge.html> (abgerufen am 25.05.2010)

<sup>165</sup> Vgl. <http://www.grueneautos.com/kategorie/antriebskonzepte/ethanol-fahrzeuge/> (abgerufen am 25.05.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Die Adaptierungen der Tankstellenbetreiber in Form von riesigen Hochdruck-Tanks sind kostspielig und können so der Verbreitung von CNG, Biogas und LPG im Weg stehen.
- Die Vorbehalte und Vorurteile gegenüber Gasen von einigen Teilen der Bevölkerung müssen durch Bewusstseinsbildung und Information abgebaut werden.

## 5.3 Batterieelektrische Antriebe

Personenkraftwagen mit batterieelektrischen Antrieben haben sowohl entscheidende Vorteile als auch entscheidende Nachteile. Ihr Betrieb erfolgt sehr leise, der Strom kann komplett aus erneuerbaren Energien gewonnen werden und der Betrieb des Fahrzeuges erfolgt praktisch emissionslos. Batterien sind allerdings sehr schwer, ihre Leistung ist noch nicht mit einem Verbrennungsmotor zu vergleichen, ihre Lebensdauer ist beschränkt und die Anschaffung eines Elektroautos ist noch teuer. Des Weiteren sind die Aufladezeiten noch nicht den Kundenwünschen entsprechend.

### 5.3.1 Elektromotoren

Elektrische Antriebe für Personenkraftwagen müssen besonderen Anforderungen genügen. Es kann unterschieden werden zwischen einem zentralen Motor für alle 4 Räder, zwischen einem Motor für jede Achse oder so genannten Radnabenmotoren, wo jedes Rad von einem Motor angetrieben wird (siehe folgende Grafik).

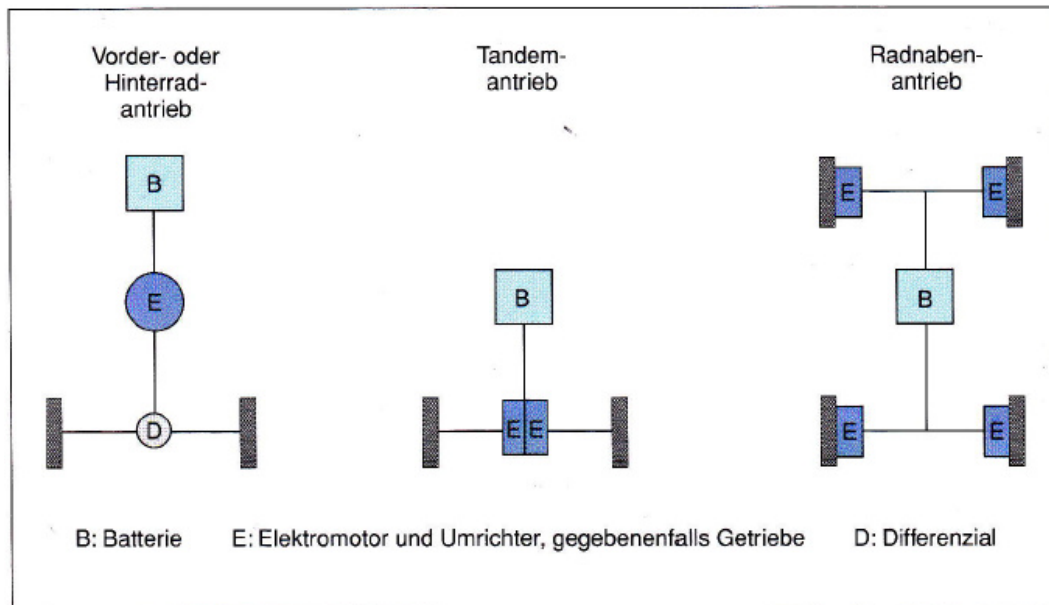


Abb. 31: Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen für Elektroautos<sup>166</sup>

Diese Technik hat sich in der Vergangenheit bewährt, da ein schweres Getriebe überflüssig wird.<sup>167</sup> Der Motor muss robust sein, Erschütterungen aushalten können. Der Motor muss in einem weiten Drehzahlbereich arbeiten können und vor allem bereits im niedrigen

<sup>166</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:61

<sup>167</sup> Vgl. Geitmann, S. (2008) Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag. S.:143ff

Drehzahlbereich über ausreichend Drehmoment verfügen. Wichtige Auswahlkriterien für einen Elektromotor für Fahrzeuge sind:

- Eine kompakte Bauweise
- Ein hoher Wirkungsgrad
- Ein geringes Gewicht
- Die Überlastbarkeit, zum Beispiel kurzzeitig bei Überholmanövern
- Ein geringer Wartungsaufwand
- Ein günstiger Preis

Für dieses Anforderungsprofil eignen sich fremderregte Gleichstrommotoren, Drehstrom-Asynchronmotoren und permanenterregte Drehstrom-Synchronmotoren.<sup>168</sup>

### 5.3.1.1 Gleichstrommotoren

Diese Motoren werden mit Gleichstrom betrieben. Lange Zeit wurden in batteriebetriebene Personenkraftwagen nur Gleichstrommotoren eingebaut, da diese direkt aus der Batterie betrieben werden können. Gleichstrommotoren verfügen über ein gutes Drehmoment im niedrigen Bereich, die Leistung fällt dann allerdings sehr schnell ab.

Gleichstrommotoren sind technisch ausgereift, sind einfach zu steuern und in der Anschaffung relativ preiswert. Bestimmte Teile des Motors, etwa der Kommutator, sind jedoch störanfällig und bedürfen regelmäßiger Wartung. Bedingt durch den Leistungsabfall im oberen Drehzahlbereich ergibt sich eine maximale Rotationsfrequenz von 7.000U/min. Des Weiteren sind der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte geringer als bei Drehstrommotoren.<sup>169, 170</sup>

### 5.3.1.2 Drehstrommotoren

Drehstrommotoren, die mit Wechselstrom betrieben werden, verdrängen als Antriebsart immer mehr die Gleichstrommotoren. Bei Drehstrommotoren wird unterschieden zwischen Synchron- und Asynchronmotoren.

Auch Drehstrommotoren sind technisch ausgereift. Sie sind kompakt gebaut, sehr robust und somit weniger wartungsbedürftig als Gleichstrommotoren. Im Gegensatz zu Gleich-

---

<sup>168</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:41ff

<sup>169</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:46ff

<sup>170</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 235ff



strommotoren erlauben sie sehr hohe Drehzahlbereiche von bis zu 15.000U/min. Des Weiteren weisen sie einen höheren Wirkungsgrad auf als Gleichstrommotoren. Nachteile der Drehstrommotoren sind der höhere Steuerungsaufwand und der damit verbundene höhere Preis im Gegensatz zu Gleichstrommotoren.

### 5.3.2 Batteriesysteme

Da die Elektromotoren technisch bereits ausgereift sind konzentriert sich die Entwicklung auf leistungsstarke und kostengünstige Batteriesysteme. Die an Bord befindliche Batterie bestimmt also quasi über die Marktchance von Elektromobilen. Ihre Leistungsdichte, das heißt die entnehmbare elektrische Leistung pro Masseneinheit, bestimmt die Endgeschwindigkeit und die Beschleunigung des Personenkraftwagens. Die Energiedichte, also der Energieinhalt pro Masseneinheit, bestimmt über die Reichweite. Marktfähige Batterien müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllen um am Markt eine ernsthaft Alternative darstellen zu können:

- Die Wiederaufladezeit sollte möglichst kurz sein
- Der Wartungsaufwand sollte sehr gering sein
- Eine Lebensdauer von fünf bis zehn Jahren sollte erreicht werden, eine Gesamtfahrleistung von 50.000 Kilometern sollte nicht unterschritten werden.
- Die Energiedichte sollte mittelfristig bei 200Wh/kg liegen
- Die Leistungsdichte sollte circa 100 W/kg erreichen
- Die Batteriekosten sollten unter 150 Euro/kWh speicherbarer Energie liegen

Die folgende Tabelle zeigt Leistungsdichte, Energiedichte, Lebensdauer und Kosten verschiedener Batterietypen.

Batterietyp	Energiedichte Wh/kg	Leistungsdichte W/kg	Lebensdauer Jahre	Kosten €/kWh
Blei	30-50	150-400	3-5	100-150
Nickel-Cadmium	45-80	80-175	3-10	225-350
Nickel-Metallhydrid	60-120	200-300	5-10	225-300
Natrium-Nickelchlorid	85-100	155	5-10	225-300
Lithium-Ionen	110-160	300	5-10	275
Lithium-Polymer	150	300	-	225
Zink-Luft	100-220	100	-	60
<b>Zielwerte</b>	<b>80-200</b>	<b>75-200</b>	<b>5-10</b>	<b>90-135</b>

Tabelle 17: Technische Daten verschiedener Batterietypen<sup>171, 172</sup>

### 5.3.2.1 Bleiakkumulator

Da der Bleiakku preisgünstig herzustellen ist und langjährige praktische Erfahrungen vorliegen, ist er auch heute noch ein häufig verwendeter Energiespeicher in Elektromobilen. Doch langfristig gesehen ist er für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ungeeignet. Der Bleiakku zeigt keinen Memoryeffekt. Auch wenn die Batterie über längere Zeit im Ladeerhaltungs-Modus steckt, zeigen sich keine nachteiligen Auswirkungen. Wichtig ist, dass die Batterie immer im geladenen Zustand gelagert wird. Im Gegensatz zu der Nickel-Cadmium Batterie sollte der Bleiakku nie völlig entladen werden. Dies hätte eine zusätzliche Belastung zur Folge und verringert die Anzahl der möglichen Ladezyklen.

Von Nachteil ist, dass er sehr schwer ist und nur wenig Energie speichern kann, sowohl die Leistungsdichte als auch die Energiedichte reichen nicht an die Sollwerte heran, siehe Tabelle 17.

### 5.3.2.2 Nickel-Cadmium Batterie

Die Nickel-Cadmium Batterie gehört zu den älteren Technologien. Sie ist seit 1950 auf dem Markt und hat sich als Traktionsbatterie in verschiedenen Fahrzeugen bewährt. Ein Fahrzeug, das mit einer Nickel-Cadmium Batterie ausgerüstet ist, verfügt über eine mehr als 50 % höhere Reichweite als mit Bleibatterien gleichen Gewichts. Die wesentlichen Vorteile der NiCd-Batterie sind das schnelle und einfache Laden in Verbindung mit einer großen Anzahl von Lade- und Entladezyklen. Bei richtiger Wartung hat die NiCd-Batterie eine Lebensdauer von einigen tausend Zyklen. Dies ist auch nach längerer Stilllegung bzw. Lagerung der Batterie möglich. Hinzu kommt noch die hohe Leistung unter Last bei niedrigen Temperaturen. Ein weiterer wichtiger Grund für den Einsatz der NiCd liegt im niedrigen Anschaffungspreis.

Ein Nachteil der NiCd-Batterie ist aber der Memoryeffekt. Um die Speicherkapazität zu erhalten muss die Batterie regelmäßig vollständig entladen werden. Des Weiteren führt das giftige Schwermetall Cadmium zu ökologischen Bedenken beim Einsatz dieses Batterietyps.

---

<sup>171</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:52, eigene Darstellung

<sup>172</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 241

### **5.3.2.3 Nickel-Metallhydrid Batterie**

Dieser Batterietyp ist eng verwandt mit der Nickel-Cadmium Batterie und wird überwiegend in modernen Elektroautos eingesetzt. Die Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) Batterie stellt eine gute Lösung für den Einsatz in batteriebetriebenen Automobilen dar. Neben dem Kapazitätsvorteil von 30% bei kleinerem Volumenbedarf gegenüber der NiCd Batterie ist dies vor allem der seltener auftretende Memoryeffekt. Dadurch müssen regelmäßige Lade- und Entladezyklen nicht so häufig vorgenommen werden. Umweltvorteile ergeben sich aus dem geringeren Gehalt an giftigen Metallen.

Der Hauptnachteil ist aber die vergleichsweise niedrige Lebenserwartung von ca. 500 Ladezyklen. Die Lebensdauer hängt direkt von der Tiefe der Entladung ab. Außerdem dauert das Schnellladen der NiMH länger als jenes der NiCd. Diese Batterie hat die besten Eigenschaften, wenn sie während der Nutzung nicht völlig entladen wird. Die Kosten der NiMH-Batterie liegen ca. 50% über der NiCd, auch das Recycling am Ende der Lebensdauer ist, genauso wie bei NiCd-Batterien, noch problematisch.

### **5.3.2.4 Lithium-Ionen Batterie**

Die Lithium-Ionen Batterie hat eine Energiedichte die circa zweimal so hoch ist wie die der Nickel-Cadmium Batterie. Zusätzlich hat die Li- Ionen ein sehr gutes Tiefentladungsverhalten. Sie ist, was den Bereich der Lade- und Entladeeigenschaften angeht, der NiCd-Batterie sehr ähnlich. Umwelttechnisch stellt die Entsorgung der Batterie dahingehend ein Problem dar, da sie durch eindringende Feuchtigkeit eine hohe Explosionsgefahr birgt. Weniger problematisch ist der giftige Metallgehalt. Insgesamt stellt diese Batterie aber eine gute Lösung für den Einsatz in Elektroautos dar. Lithium-Ionen Batterien haben keinen Memoryeffekt, ihre Kapazität hängt relativ stark von der Temperatur ab, der optimale Temperaturbereich ist zwischen 5 und 30°Celsius. Auch der Preis ist noch relativ hoch.

### **5.3.2.5 ZEBRA Batterie**

Die ZEBRA Batterie, auch Hochtemperaturbatterie oder Natrium-Nickelchlorid Batterie, benötigt Arbeitstemperaturen zwischen 250 und 330°C. Die Betriebstemperatur wird durch zusätzliche Heizmatten im Batterietrog geregelt. Die Betriebstemperatur muss auch bei langen Standzeiten immer erhalten werden, dies benötigt zusätzliche Energie. Ohne externe Energiezufuhr dauert es weniger als eine Woche bis sich die Batterie für Heizzwecke komplett entladen hat.

Hochtemperaturbatterien haben im Vergleich zu Bleibatterien mehrere Vorteile:

- Sie können dreimal mehr Energie speichern
- Sie sind wartungsfrei
- Die Abwärme der Batterie wird für Heizungszwecke genutzt
- Sie zeigen keine chemische Selbstentladung
- Nachteile sind:
- Die Betriebstemperatur muss immer aufrecht erhalten werden
- Die Lebenserwartung ist noch relativ gering<sup>173, 174, 175, 176</sup>,

### 5.3.3 Reichweiten von Elektroautos

Die Reichweite von batteriebetriebenen Elektroautos spielt eine wichtige Rolle bei der Akzeptanz der Kunden und somit bei den Chancen am Markt. Obwohl der Durchschnittsösterreicher an einem Tag sehr selten Distanzen von über 50 km zurücklegt wünscht er sich eine Reichweite die mit denen von Benzin- und Dieselaautos vergleichbar ist.

Um annähernd dieselbe Reichweite wie bei Autos mit Verbrennungsmotor zu erreichen gibt es 2 gangbare Wege. Entweder die Batterien werden größer dimensioniert, was jedoch zahlreiche negative Nebenwirkungen wie Gewichtszunahme und Platzreduktion zur Folge hätte, oder die Batterietechnik wird erhöht, um höhere Leistungsdichten zu erreichen. Die technologische Weiterentwicklung wird aber nicht kurzfristig erreichbar sein. So bleibt den Kunden nur der Ausweg mit den geringeren Reichweiten vorlieb zu nehmen. Durchschnittliche Reichweiten von derzeit oder in naher Zukunft am Markt erhältlichen Elektro-PKWs zeigt die folgende Tabelle.

Marke und Modell	Reichweite
Renault Twingo Elettrica	130 km
Smart Pure Elettrica	100 km
LUIS 4U	280 km
Audi e-tron	248 km
MINI E	240 km
Peugeot iOn	130 km
Tesla Roadster	400 km
TH!NK City	200 km

<sup>173</sup> Vgl. <http://www.varta-automotive.de/index.php?id=37&L=1> (abgerufen am 10.06.2010)

<sup>174</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:53ff

<sup>175</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 241ff

<sup>176</sup> Vgl. <http://www.panther-batterien.de/deutsch/infocenter/batterie-lexikon.html> (abgerufen am 10.06.2010)

Toyota FT-EV	80 km
--------------	-------

Tabelle 18: Reichweite von Elektroautos<sup>177, 178</sup>

### 5.3.4 Herkunft des elektrischen Stroms

Um bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen wirklich von einem nachhaltigen Konzept sprechen zu können muss auch geklärt werden woher der Strom kommt oder woher der Strom besser kommen sollte.

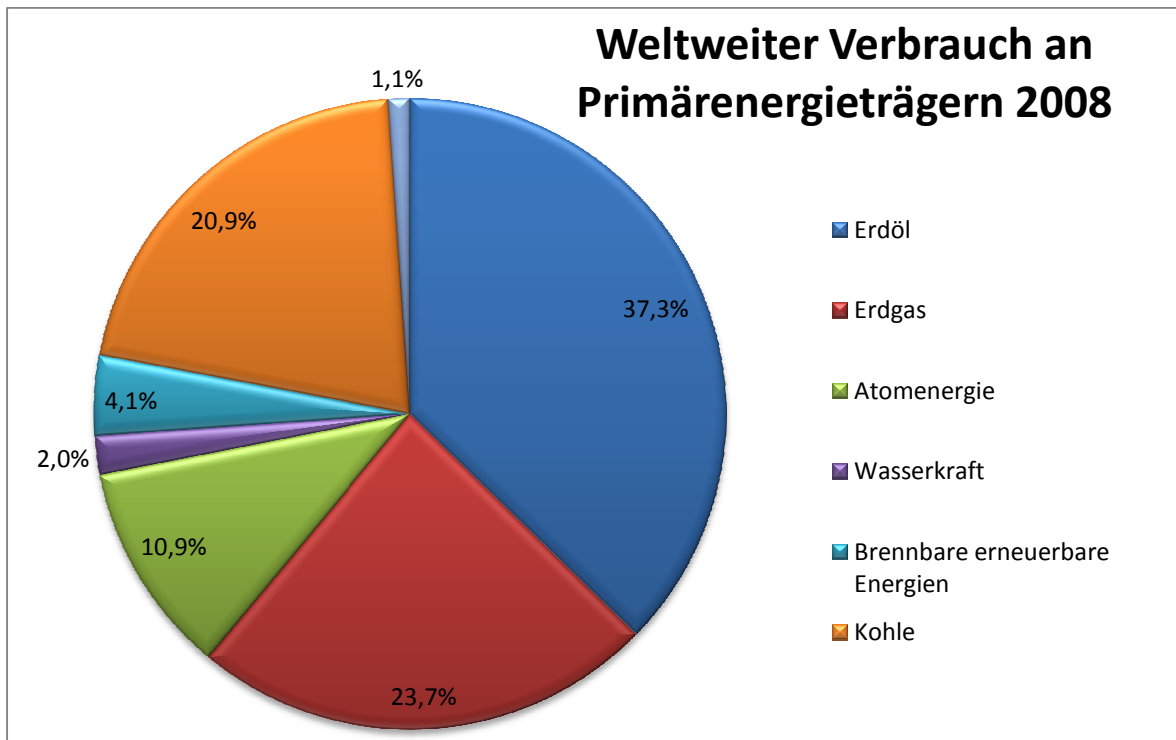


Abb. 32: Primärenergieträger 2008<sup>179</sup>

Wie in der vorhergehenden Grafik abzulesen ist, wurden 2008 weltweit circa 80% der Primärenergie aus fossilen Energieträgern gewonnen. Um das Konzept von batteriebetriebenen Fahrzeugen nachhaltiger zu gestalten muss der Anteil an erneuerbaren Energieträgern weltweit stark erhöht werden. Da in dieser Tabelle der gesamte Energieverbrauch inkludiert ist zeigen die folgenden Grafiken die Herkunft des Stromes in Österreich.

<sup>177</sup> Vgl. <http://www.hybrid-autos.info/elektro-fahrzeuge/> (abgerufen am 17.06.2010)

<sup>178</sup> Vgl. <http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Erwerbbar> (abgerufen am 17.06.2010)

<sup>179</sup> Vgl. IEA International Energy Agency (2009). Key World Energy Statistics 2009. Online abrufbar unter: [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key\\_stats\\_2009.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf) (abgerufen am 15.06.2010)

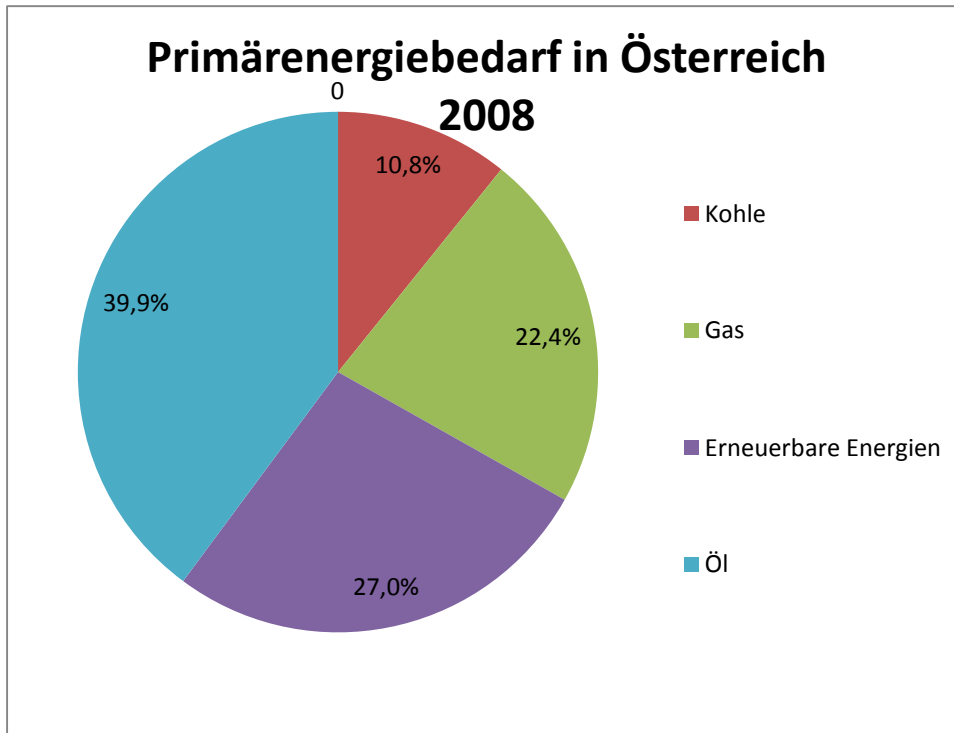


Abb. 33: Primärenergiebedarf in Österreich 2008<sup>180</sup>

### 5.3.5 Bewertung des Systems

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Bewertung und den Potenzialen von Elektro-PKWs. Es werden die Vor- und Nachteile aufgelistet, die benötigte Versorgungsinfrastruktur wird kurz skizziert. Des Weiteren werden bereits am Markt erhältliche Modelle vorgestellt.

#### 5.3.5.1 SWOT-Analyse der batterieelektrischen Antriebe

<b>Strengths</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Betrieb ist geräuscharm und stößt kein CO<sub>2</sub> aus</li> <li>• Der Betrieb ist auch in Gebäuden wie Tiefgaragen problemlos möglich</li> <li>• Die Motorentechnik ist technisch ausgereift und wartungsarm</li> <li>• Die Betriebskosten sind sehr gering, hängen vom Strompreis ab</li> <li>• Die Erzeugung des dafür benötigten Stroms erfolgt problemlos</li> <li>• Langjährige Erfahrung in der Konstruktion von Elektroautos</li> </ul>
<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei der Herstellung des Stroms entstehen Emissionen</li> </ul>

<sup>180</sup> Vgl. [www.statistik.at](http://www.statistik.at) (abgerufen am 08.07.2010), Berechnung e-control

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringere Leistung als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren</li> <li>• Geringere Reichweite</li> <li>• Öffentliche Infrastruktur (Schnellladestationen) ist noch nicht vorhanden</li> <li>• Hohe Temperatursensibilität der Batterien</li> <li>• Hoher Platzbedarf im PKW durch die Größe der Batterie</li> <li>• Beschränkte Lebensdauer des Akkus</li> <li>• Lithium für die Batterien ist nur begrenzt vorhanden</li> <li>• Lange Ladezeiten der Batterien</li> </ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die vermehrte Herstellung von Strom aus erneuerbaren Energien lässt das Konzept nachhaltiger werden</li> <li>• Technologischer Fortschritt bei den Akkumulatoren lässt Reichweite und Leistung steigen</li> <li>• Durch Großserienproduktion sinkt der Preis für Elektroautos</li> <li>• Bei den Kunden findet ein Umdenken statt, die Reichweite ist kein entscheidendes Kriterium zum Kauf</li> </ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Entsorgung der verbrauchten Batterien kann ökologisch nicht optimiert werden</li> <li>• Der technologische Fortschritt gerät ins Stocken, die Leistungsdichte der Batterien kann nicht erhöht werden</li> <li>• Strom wird nicht vermehrt aus erneuerbaren Energien produziert</li> </ul>

### 5.3.5.2 Versorgungsinfrastruktur

Neben der Einführung rein elektrisch betriebener Fahrzeuge ist zunächst die serienmäßige Einführung von Hybridfahrzeugen attraktiv, weil Ladeinfrastruktureinrichtungen bislang kaum vorhanden sind. Das Konzept der batterieelektrischen Antriebe basiert auf der Idee, sein Auto zu Hause aufzuladen, bei Ladezeiten von bis zu 10 Stunden wird dies vermutlich über Nacht geschehen.

Die Aufladung zu Hause ist auch ein wichtiger Baustein bei dem Modell des „Vehicle to Grid“ (V2G). Durch die Speicherung elektrischer Energie ergibt sich die Möglichkeit, Elektroautos interaktiv als mobile Speichersysteme ins Netz zu integrieren. Elektroautos sollen in Zukunft als Last für „überschüssige“ erneuerbare Energie, als Quelle für Regelleistung oder zur besseren Auslastung vorhandener Kraftwerkskapazitäten genutzt werden. Viele Elektroautos, die als virtuelles Kraftwerk zusammengeschaltet werden, könnten konventi-

onelle Regelkraftwerkskapazität ersetzen oder der lokalen Notstromversorgung dienen. Für die Netzintegration müssen Elektrofahrzeuge kommunikationstechnisch mit dem jeweiligen Netzbetreiber bzw. Betreiber der Ladeinfrastruktur verbunden sein, um die Potentiale als Stromspeicher bzw. Regelenergieleister zu erschließen. Die notwendige Netzintegration von Elektrofahrzeugen kann Hand in Hand mit dem Umbau des Stromnetzes zum „Smart Grid“, d.h. mit der Verbreitung intelligenter Stromzähler, Demand Side Management, virtueller Kraftwerke u.v.m. geschehen.

Bei ausschließlich elektrisch betriebenen PKW dauert das Laden von 12 kWh Strom (ausreichend für ca. 100 km bei effizienten Fahrzeugen) bei konventioneller haushaltsüblicher Anschlussleistung von 3 kW rund vier Stunden.

Da der PKW im Schnitt rund 23 Stunden am Tag ruht, steht theoretisch ausreichend Ladezeit zur Verfügung – für Pendlerfahrzeuge tagsüber am Arbeitsplatz oder abends an der heimischen Steckdose. Umfragen haben jedoch ergeben, dass Nutzer höchstens 2 Stunden Ladezeit akzeptieren und auch in Sachen Reichweite kaum Abstriche machen wollen. Deswegen sind für eine breite Akzeptanz, höhere Reichweiten und vielfältigere Nutzungsmöglichkeiten, Schnellladungen mit mehr als der Leistung von 10 kW, die ein Starkstromanschluss im Haushalt hat, notwendig. Hohe Leistungen (50-250 kW) für schnelle Ladezeiten könnten in kommerziell betriebenen Stromtankstellen zu Verfügung gestellt werden.

Die Kosten für derartige Ladestationen belaufen sich auf 1.000 € bis 7.000 € plus Wartungskosten von 150 € im Jahr. Bei einer Leistung von 75 kW könnten 12 kWh (ausreichend für 100 km) in 10 min geladen werden. Geht man davon aus, dass zwanzig Fahrzeuge am Tag an dieser Station aufgeladen werden, würden bei einem Preis von 20 Cent/kWh im Jahr 17.600 € umgesetzt werden. Für einen höheren Umsatz müssten Geschäftspläne berücksichtigen, wie viele Fahrzeuge realistisch am Tag geladen werden und ob die Nutzer bereit sind, für eine Schnellladung mehr als den normalen Strompreis zu zahlen.

Die Errichtung einer öffentlichen Tankinfrastruktur kann sehr flexibel geschehen. Schnellladestationen in Einkaufszentrum, bei Parkplätzen, bei den Arbeitsplätzen passen sich perfekt den jeweiligen Bedürfnissen der Nutzer an.<sup>181, 182, 183</sup>

### 5.3.5.3 Verfügbarkeit der Ressourcen

<sup>181</sup> Vgl. <http://www.grueneautos.com/schlagwort/schnellladestation/> (abgerufen am 21.06.2010)

<sup>182</sup> Vgl. Marwede M., Knoll M. (2010). Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, S: 6ff

<sup>183</sup> Vgl. Scherf C. (2008) Die postfossile Blackbox: Alternative Antriebsaggregate im Rückspiegel vergangener Verkehrsvorhaben. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. S: 42ff



Hier geht es vor allem um die Verfügbarkeit von Lithium, welches vielseitig einsetzbar ist. Auf dem Gebiet von Elektro-PKW's ist es nach dem derzeitigen Stand der Technik unentbehrlich für die Fertigung wiederaufladbarer Akkus wie zum Beispiel Lithium-Ionen-Akkus und Lithium-Polymer-Akkus.

In den Jahren 2007 wurden weltweit 25.800 Tonnen Lithium abgebaut, 2008 wurden 27.400 Tonnen Lithium abgebaut. Die Nachfrage nach Lithium steigt also, wie die folgende Abbildung zeigt.

Land	Produktion 2007	Produktion 2008	Rohstoffreserven <sup>184</sup>	Mindestreservebasis <sup>185</sup>
USA	k.A.*	k.A.*	38000	410000
Argentinien	300	3200	k.A.	k.A.
Australien	6910	6900	170000	220000
Bolivien	-	-	-	5400000
Brasilien	180	180	190000	910000
Kanada	707	710	180000	360000
Chile	11100	12000	3000000	3000000
China	3010	3500	540000	1100000
Portugal	570	570	k.A.	k.A.
Zimbabwe	300	300	23000	27000
<b>Welt gesamt</b>	<b>25800**</b>	<b>27400**</b>	<b>4100000</b>	<b>11000000</b>

Tabelle 19: Verfügbarkeit von Lithium<sup>186</sup>

\*Die USA machen keine Angaben zu den jährlichen geförderten Mengen

\*\* Exklusive der US-Produktion

#### 5.3.5.4 Betriebskosten

Batterieelektrische Fahrzeuge haben in der Regel sehr niedrige Betriebskosten (man kann den günstigen Nacht-Strom zum Aufladen nützen und kommt so bei einem Verbrauch von 4–25 kWh pro 100 km, der Verbrauch einer Kilowattstunde kostet dem Endabnehmer ab 6,5 Euro-Cent<sup>187</sup>. Dem stehen derzeit infolge teurer Kleinserienfertigung hohe Anschaffungskosten gegenüber. Die Akkumulatoren, die einen großen Teil der Kos-

<sup>184</sup> Bezeichnet diejenigen Reserven aus der Mindestreservebasis die zum Zeitpunkt der Entdeckung wirtschaftlich abgebaut werden können

<sup>185</sup> Bezeichnet aus allen bekannten Ressourcen diejenigen Reserven, die bestimmten physikalischen und chemischen Anforderungen gerecht werden (Dichte, Qualität, Tiefe,..)

<sup>186</sup> Vgl. Lithium, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2009, online abrufbar unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2009-lithi.pdf> (abgerufen am 21.06.2010)

<sup>187</sup> Vgl. [http://www.verbund.at/cps/rde/xchg/internet/hs.xsl/10172\\_493.htm](http://www.verbund.at/cps/rde/xchg/internet/hs.xsl/10172_493.htm) (abgerufen am 08.07.2010)

ten verursachen, besitzen zum Teil noch eine begrenzte Lebensdauer und müssen nach einigen Jahren ersetzt werden. Dagegen sind die niedrigeren Steuersätze für Strom aus dem Stromnetz gegenüber den Steuersätzen für die heutigen Treibstoffe ein gewichtiges Argument zu Gunsten von Elektroautos. Der folgende Vergleich zeigt die viel niedrigeren Betriebskosten deutlich.

Modell	LUIS 4U green	LUIS 4U 1.5
Motorisierung	Elektromotor	Benzin-Direkteinspritzer
Preis je Einheit	0,065€ je kWh	1,19€ je Liter
Kaufpreis	39.900 €	18.900 €
Verbrauch	12,5 kWh/100 km	5,4 Liter/100 km
Reichweite	200 km	600 km
Energiespeicher	25 kWh	40 Liter
CO2-Ausstoß	0g/km	EURO 5 Klasse
Kosten "Volltanken"	€ 1,63	€ 47,60
Kosten 100 km	€ 0,81	€ 6,43

Tabelle 20: Vergleich LUIS 4U green und LUIS 4U 1.5L188

### 5.3.6 Praxisbeispiele

Es gibt auf dem Markt bereits zahlreiche Personenkraftwagen die mittels einem batterieelektrischem Antrieb angetrieben werden.<sup>189, 190</sup> Jedoch hat noch keiner dieser PKW es geschafft in großer Zahl auf dem Markt verkauft zu werden. Viele dieser PKWs werden von kleinen Werkstätten gefertigt. Erst in letzter Zeit werden von namhaften Herstellern ernsthaft Anstrengungen unternommen den Markt für batterieelektrische Antriebe zu bedienen.

Ein Modell eines großen Autoherstellers ist der Peugeot iOn. In Zusammenarbeit mit dem japanischen Autohersteller Mitsubishi hat der französische Konzern Peugeot einen rein elektrisch angetriebenen Kleinwagen entwickelt, der bereits Ende 2010 auf den Markt kommen soll. Der Elektromotor des Peugeot iOn bezieht seine Energie aus Lithium-Ionen-Batterien, die voll aufgeladen eine Reichweite von rund 130 km ermöglichen sollen. Damit ist der Peugeot iOn eine ideale Lösung für die Bedürfnisse der meisten Bewohner von Ballungszentren unter Berücksichtigung der täglich zu fahrenden Strecken und des Umweltschutzes.

<sup>188</sup> Vgl. <http://4u.luis.de/elektroauto/techn-daten> (abgerufen am 08.07.2010)

<sup>189</sup> Vgl. [http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Elektroautos](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Elektroautos) (abgerufen am 18.06.2010)

<sup>190</sup> Vgl. <http://www.grueneautos.com/kategorie/antriebskonzepte/elektroautos/> (abgerufen am 18.06.2010)



Abb. 34: Peugeot iOn<sup>191</sup>

Ausgestattet mit vier Türen, vier Sitzen, einer Länge von 3,48 Meter sowie einem Wendekreis von 4,50 m wird das bevorzugte Einsatzgebiet des iOn die Stadt sein. Der Elektromotor verfügt über eine Leistung von 47 kW (64 PS) mit einem Drehmoment von 180 Nm. Die Höchstgeschwindigkeit des iOn wird mit 130 km/h angegeben, was ohne Probleme auch Autobahnfahrten ermöglicht. Sind die Lithium-Ionen-Batterien nach max. 130 Kilometern leer, können sie einfach an einer herkömmlichen Steckdose in sechs Stunden vollständig aufgeladen werden. Soll es einmal schneller gehen, lassen sie sich dank Schnellladesystem auch in 30 Minuten zu 80 Prozent aufladen.

Anders als das Stadtauto von Peugeot verfolgt die LUIS GmbH mit Ihrem Modell einen anderen Weg. Der LUIS 4U green ist ein Elektro-Geländewagen und ist noch im Laufe des Jahres 2010 käuflich zu erwerben. Angetrieben wird der LUIS 4U green von einem 27 kW starken Elektromotor, der seine Energie aus leistungsstarken Lithium-Eisen-Phosphat-Akkus bezieht. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt circa 120km/h. Voll aufgeladen ermöglichen sie eine Reichweite von mehr als 200 Kilometern und dank Schnellladezeiten von nur 20 Minuten (bei 380V bis zu 90% Aufladung) ist der Mini-Elektro-Geländewagen sogar langstreckentauglich. Die Ladezeit an der Haushaltssteckdose beträgt je nach Version des Fahrzeuges zwischen 5-16 Stunden.

<sup>191</sup> Vgl. <http://www.peugeot.de/newsletter/peugeot/2009-12/artikel2.php> (abgerufen am 18.06.2010)



Abb. 35: LUIS 4U green<sup>192</sup>

Erfreulich ist die Verwendung von modernen, wartungsfreien und umweltfreundlichen Lithium-Eisen-Phosphat Akkus ( $\text{LiFePO}_4$ ) als Energiespeicher. So funktionieren sie auch bei wirklich extremen Temperaturen von  $-45$  bis  $+70^\circ\text{C}$  und sind besonders explosions sicher da eine Überladung, wie es häufig bei herkömmlichen Lithium Akkus der Fall ist, ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren belegen diese Batterien sehr umweltfreundlich: Sie sind komplett frei von giftigen Schwermetallen wie Blei oder Nickel und können nach Ihrem Gebrauch dem Abfall-Kreislauf zugeführt werden.<sup>193</sup>

Ein weiteres, komplett verschiedenes, Konzept bietet der seit 2008 auf dem amerikanischen Markt verkaufte Tesla Roadster. Der Tesla ist ein zweisitziger Sportwagen mit einer Leistung von 252 PS. Die elektrische Energie des Tesla Roadsters wird von einer Lithium-Ionen Batterie bereitgestellt, welche sich hinter den Sitzplätzen befindet. Der elektrische Energiespeicher hat ein Gewicht von ca. 500 kg bei einem Gesamtgewicht des Fahrzeuges von ca. 1250 kg. Die angegebene Reichweite mit einer Akkuladung beträgt circa 350 km. Je nach Fahrstil variiert sie jedoch zwischen 100 und 500 km. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt circa 210km/h.<sup>194</sup> Der Verkaufspreis beträgt in Europa mindestens 75.300 Euro.<sup>195</sup>

<sup>192</sup> Vgl. <http://www.grueneautos.com/2010/06/elektroauto-luis-4u-green/> (abgerufen am 18.06.2010)

<sup>193</sup> Vgl. <http://4u.luis.de/elektroauto/techn-daten> (abgerufen am 18.06.2010)

<sup>194</sup> Vgl. [http://www.teslamotors.com/performance/electric\\_power.php](http://www.teslamotors.com/performance/electric_power.php) (abgerufen am 18.06.2010)

<sup>195</sup> Vgl. [http://www.autobild.de/artikel/fahrbericht-tesla-roadster\\_219545.html](http://www.autobild.de/artikel/fahrbericht-tesla-roadster_219545.html) (abgerufen am 18.06.2010)



Abb. 36: Tesla Roadster<sup>196</sup>

### 5.3.7 Zusammenfassung Batterieelektrische Antriebe

- Große Teile der verwendeten Technik sind seit Jahren ausgereift. Der Elektromotor weist einen sehr guten Wirkungsgrad auf, ist wartungsarm und genügt den Kunden in puncto Beschleunigung, Leistung und Geschwindigkeit.
- Die Reichweite, ein sehr wichtiges Kriterium für Kunden, kann auf Grund der heute zur Verfügung stehenden Batterietechnik nicht mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor konkurrieren. Als heutiges Einsatzgebiet für Elektroautos bietet sich vor allem die Stadt an. Viele der heute produzierten Elektrofahrzeuge sind auf dieses Einsatzgebiet zugeschnitten. Sie sind kleiner dimensioniert, geräuscharm und verursachen vor Ort keine Emissionen.
- Die an Bord befindliche Batterie ist sehr groß und schwer, in der Gestaltung ihrer Außenform ist sie wenig flexibel und benötigt daher viel Platz im Innenraum. Auch verliert die Batterie, im Gegensatz zu Benzin und Diesel, Energie nach längerer Standzeit. ZEBRA-Batterien brauchen einen Teil ihrer eigenen gespeicherten Energie um betriebsfähig zu bleiben. Batterien haben eine begrenzte Lebensdauer und sind in der Anschaffung sehr teuer, sie müssen im Regelfall alle 5 bis 10 Jahre getauscht werden.
- Batterieelektrische Fahrzeuge sind derzeit in der Herstellung auch bei größeren Stückzahlen um circa 40% teurer als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

<sup>196</sup> Vgl. <http://karmakonsum.de/wp-content/uploads/2009/05/2007teslaroadster-full1.jpg> (abgerufen am 18.06.2010)

Ihre Betriebskosten und die Wartungskosten sind allerdings deutlich geringer. Um die hohen Anschaffungskosten für Elektroautos zu senken, setzen derzeit viele Hersteller auf den Einbau von Batterien mit beschränkter Kapazität, was jedoch eine Reduktion der Reichweite mit sich bringt.

- Bezieht man die Energieerzeugungskette in den Primärenergieverbrauch von batterieelektrischen Fahrzeugen mit ein, so ergeben sich im Vergleich zu einem modernen Auto mit Verbrennungsmotor bei den Schadstoffemissionen keine nennenswerten Vorteile. Zurzeit sprechen nur der fehlende Schadstoffausstoß vor Ort und die niedrigere Geräusentwicklung für Elektroautos. Die vermehrte Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien kann diese Bilanz in Zukunft zu Gunsten von Elektroautos ändern. Dies gilt als größtes Potenzial von batterieelektrischen Antrieben.
- Der Aufladevorgang zu Hause aus der Steckdose dauert bis zu 10 Stunden. Die Kunden tolerieren aber nur kürzere Zeiten. Durch Schnellladestationen kann die Dauer auf bis zu 10 Minuten verkürzt werden. Dies ist vor allem bei Überlandfahrten wichtig. Für den täglichen Gebrauch ist die Aufladung über Nacht allerdings vollkommen ausreichend. Hier ist vor allem Bewusstseinsbildung und Information notwendig.
- Auf Grund der hohen Anschaffungskosten bietet sich heute ein Einsatz in kleinen Nischengebieten an, wie zum Beispiel Taxis oder Kurierdienste in Städten.
- Die Marktchancen von batterieelektrischen Fahrzeugen werden erst mittel- bis langfristig steigen. Ein Großteil der Verbraucher wird erst dann einen Pkw mit rein elektrischem Antrieb kaufen, wenn dieser zu einem vertretbaren Preis die vom Verbrennungsmotor gewohnten Fahrleistungen bringt.
- Elektroautos können auch von Seiten der öffentlichen Hand gefördert werden, etwa durch steuerliche Anreize, durch direkten Zuschuss beim Kauf oder durch die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur.

## 5.4 Solarantrieb

Personenkraftwagen die mit der Energie der Sonne betrieben werden unterscheiden sich von batterieelektrischen Fahrzeugen nur durch die Herkunft der Energie für die Elektromotoren. Während bei batterieelektrischen Antrieben die Energie für die Motoren zumeist aus dem herkömmlichen Stromnetz stammt, beziehen solarbetriebene Fahrzeuge direkt aus der an Bord umgewandelten Sonnenenergie, dieser Vorgang wird als Photovoltaik bezeichnet. Dieser Umstand bedingt auch, dass Solarfahrzeuge nicht wie alle anderen Autos ein „typisches“ Aussehen besitzen sondern ihre Außenform darauf ausgelegt ist eine so große Oberfläche wie möglich zur Sonne zu richten.

Im folgenden Kapitel werden die Funktionsweise der Photovoltaik, die verschiedenen Arten von Solarzellen und Praxisbeispiele vorgestellt. Des Weiteren wird das System des Solarantriebes in Hinblick auf seine Zukunftschancen und Alltagstauglichkeit bewertet.

### 5.4.1 Funktionsprinzip Photovoltaik

Wie bereits in der Einleitung des Kapitels erwähnt beschreibt der Begriff Photovoltaik die Umwandlung der Strahlungsenergie des Lichts, zumeist der Sonne, in elektrische Energie durch Solarzellen. Die grundlegende Funktionsweise einer siliziumbasierten Solarzelle lässt sich am besten anhand der folgenden Abbildung erklären.

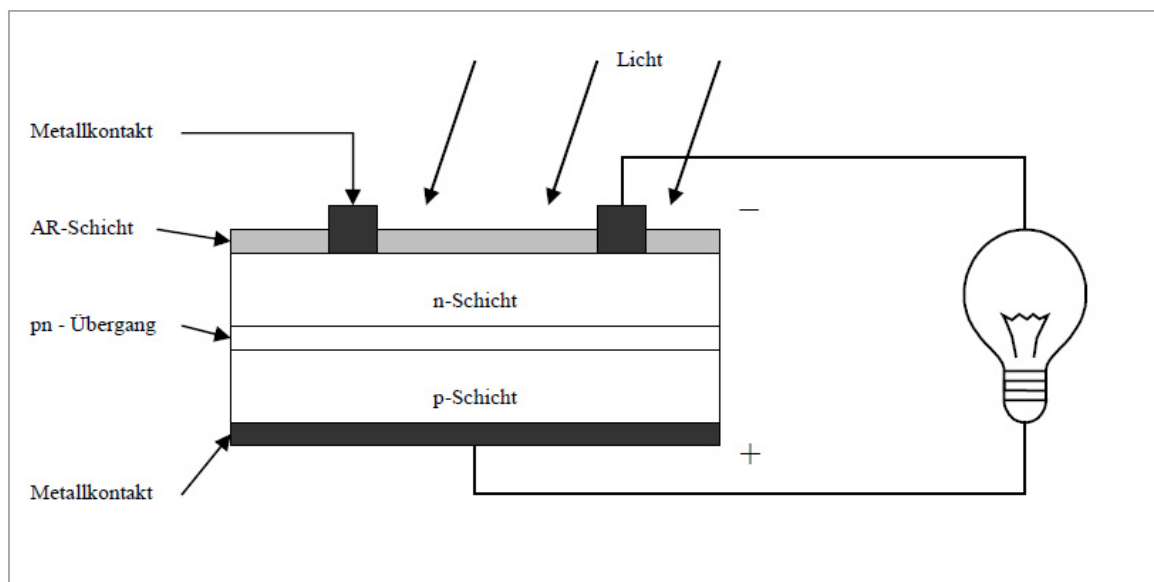


Abb. 37: Funktionsprinzip einer Solarzelle<sup>197</sup>

<sup>197</sup> Vgl. Green, M. (2000): Photovoltaics - Technologically Overview. Energy Policy 28. S. 990

Das von der Anti-Reflektionsschicht (AR-Schicht) absorbierte Licht erzeugt positiv geladene Teilchen in der n-Schicht (Halbleiter mit negativem Ladungsüberschuss) und Teilchen mit negativem Ladungszustand in der p-Schicht (Halbleiter mit positivem Ladungsüberschuss). Diese Ladungsträger bewegen sich auf den pn-Übergang zu und bilden sogenannte Elektronen-Loch Paare. Die negativ geladenen Elektronen und die positiv geladenen Löcher werden dann von der Schicht mit dem jeweils gleichartigen Ladungsüberschuss angezogen. Die positiv geladenen Teilchen werden in die p-Schicht gezogen und umgekehrt wodurch eine elektrische Spannung entsteht, die dann durch die Metallkontakte oben und unten abfließen und nutzbar gemacht werden kann, etwa für den Antrieb eines Elektromotors in einem Personenkraftwagen.



Abb. 38: Solarauto NUNA 3<sup>198</sup>

### 5.4.2 Arten von Solarzellen

Wie bereits bei den Batterien für batterieelektrische Antriebe gibt es auch eine Vielzahl von verschiedenen Solarzellen. Solarzellen werden nach verschiedenen Merkmalen kategorisiert. Zum einen unterscheidet man nach den verwendeten Halbleitermaterialien wie beispielsweise Silizium oder nach der Materialverarbeitung in Dickschicht oder Dünnschichtzellen.

#### 5.4.2.1 Kristalline Silizium-Solarzellen

Die gesamte Erde besteht zu etwa 15 Massenprozent aus Silizium. Insbesondere der Erdmantel setzt sich zu einem beträchtlichen Anteil aus silikatischen Gesteinsschmelzen zusammen. Die Erdkruste besteht zu etwa 25,8 Gewichtsprozent aus Silizium, damit ist es das zweithäufigste chemische Element nach dem Sauerstoff.

<sup>198</sup> Vgl. [http://www.speedace.info/solar\\_cars/solar\\_car\\_images/solar\\_Car\\_Nuna\\_3\\_at\\_Zandvoort.jpg](http://www.speedace.info/solar_cars/solar_car_images/solar_Car_Nuna_3_at_Zandvoort.jpg) (abgerufen am 19.07.2010)



Monokristalline und polykristalline Solarzellen machen gemeinsam circa 85 Prozent der weltweit verwendeten Solarzellen aus. Der Unterschied zwischen mono- und polykristallinen Zellen besteht in der Beschaffenheit der inneren Gitterstruktur. Silizium ist ein in der Natur sehr weit verbreitetes Element, das aus Quarzen gewonnen werden kann.

Für die Herstellung von monokristallinen Solarzellen wird das Silizium durch das sogenannte Czochralski-Verfahren stabförmig eingeschmolzen und anschließend in runde Scheiben (sogenannte Wafer) zersägt. Die kreisrunden Scheiben werden anschließend zu annähernd quadratischen Flächen zurechtgeschnitten und an der Ober- und Unterseite entsprechend dotiert. Die folgende Grafik zeigt eine monokristalline Solarzelle.

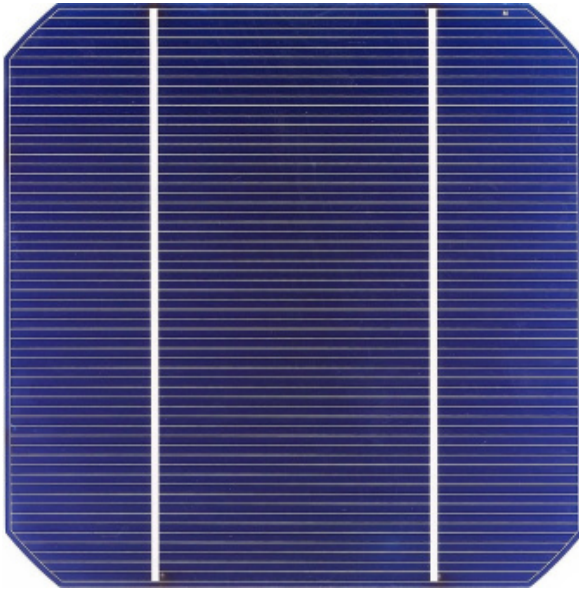


Abb. 39: Monokristalline Solarzelle<sup>199</sup>

Bei polykristallinen Zellen wird in der Herstellung die Einkristallbindung unterbunden, während das Silizium stark erhitzt und anschließend in einer Gussform abgekühlt wird. Durch die unregelmäßige Ausrichtung der Kristalle zeigt die Oberfläche eine schillernde Struktur, wie die folgende Grafik einer polykristallinen Solarzelle zeigt.

<sup>199</sup> Vgl. [http://img.directindustry.de/images\\_di/photo-g/monokristalline-photovoltaik-solarzelle-370450.jpg](http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/monokristalline-photovoltaik-solarzelle-370450.jpg) (abgerufen am 19.07.2010)

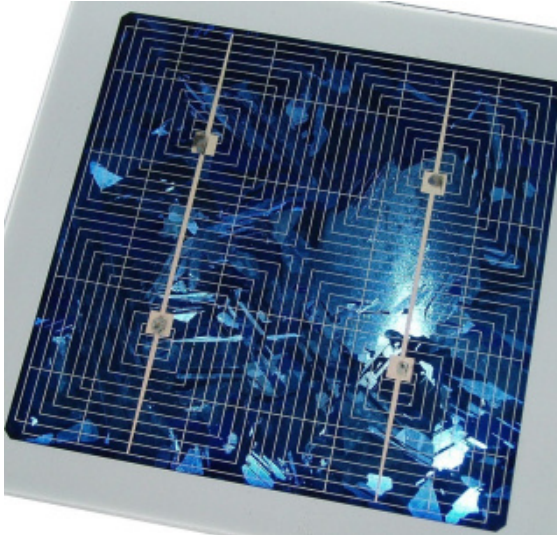


Abb. 40: Polykristalline Solarzelle<sup>200</sup>

In der Herstellung sind polykristalline Solarzellen kostengünstiger, weisen aber auch einen geringeren Wirkungsgrad als monokristalline Zellen auf.

Seriengefertigte monokristalline Solarzellen weisen einen Wirkungsgrad zwischen 13 und 17 Prozent auf, während polykristalline Zellen auf einen Wert zwischen 11 und 15 Prozent kommen. Um möglichst wenig Licht zu reflektieren müssen kristalline Solarzellen eine Dicke von mindestens 100 µm aufweisen.

Die Solarzellen werden in der weiteren Verarbeitung zu Modulen zusammengefasst. Ein Solarmodul besteht typischerweise aus 36 einzelnen Solarzellen um eine 12V Batterie laden zu können. Die Solarzellen werden in den Modulen zwischen zwei abgehärteten Glasflächen eingelegt, um sie im wetterfest zu machen. Gut verarbeitete Solarmodule verfügen über eine Lebensdauer von etwa 25 Jahren.

Unter sogenannten Hochleistungszellen versteht man monokristalline Solarzellen, die durch verschiedene aufwendige technische Verfeinerungen wie pyramidenförmige Oberfläche, verbesserte Kontakte und neue Halbleiterschichtungen in der Serienproduktion einen wesentlich höheren Wirkungsgrad von bis zu 20 Prozent erreichen.<sup>201 202 203</sup>

<sup>200</sup> Vgl. [http://www.esys.org/technik/Solarzellen\\_auf\\_Yachten-Polykristalline\\_Solarzelle.jpg](http://www.esys.org/technik/Solarzellen_auf_Yachten-Polykristalline_Solarzelle.jpg) (abgerufen am 19.07.2010)

<sup>201</sup> Vgl. Luther, Preiser, & Willeke. (2003). Solar Modules and Photovoltaic Systems. Heidelberg: Springer Verlag. S. 51ff

<sup>202</sup> Vgl. Falk, Dürschner, & Remmers. (2005). Photovoltaik für Profis. Berlin: Professionell & Praxisnah. S. 121ff

<sup>203</sup> Vgl. <http://www.iwr.de/solar/technik/typen.html> (abgerufen am 19.07.2010)

#### 5.4.2.2 Dünnschicht-Solarzellen

Dünnschichtzellen funktionieren nach demselben Schema wie siliziumbasierte Zellen, weisen einen geringeren Wirkungsgrad auf als siliziumbasierte Zellen, sind jedoch im Allgemeinen kostengünstiger herzustellen. Bei der Herstellung wird eine dünne Schicht von Halbleitermaterialien während der Gasphase auf ein Trägermaterial aufgetragen. Die Halbleiterschicht ist bei diesem Verfahren zwischen 100- und 1000-mal dünner als bei den siliziumbasierten Solarzellen. Da das Zurechtschneiden der Wafer bei der Herstellung entfällt, kann das Halbleitermaterial auf einer Fläche von bis zu einem Quadratmeter aufgetragen werden.

Da der Verbrauch an Halbleitermaterial bei der Herstellung von Dünnschichtzellen deutlich geringer ist, werden auch andere Basismaterialien als Silizium in Betracht gezogen. Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium (a-Si) werden vielfach bei Taschenrechnern und Uhren sowie Outdoor-equipment eingesetzt. Der Wirkungsgrad schwankt zwischen 6-8 Prozent. Der Vorteil von amorphem Silizium liegt darin, dass ein breiteres Spektrum an Licht absorbiert wird, als bei kristallinem Silizium. Daher besitzen Zellen aus amorphem Silizium eine höhere Verschattungstoleranz und eignen sich auch für den Gebrauch in geschlossenen Räumen.

Weitere Halbleitermaterialien für Dünnschichtzellen bestehen aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) oder aus Cadmium-Telurid (CdTe) die einen Modulwirkungsgrad zwischen 8 und 10 Prozent aufweisen. Probleme hierbei sind jedoch die Verwendung von giftigen Materialien und die limitierten bekannten Vorräte an Indium und Tellurium.<sup>204, 205, 206</sup>

#### 5.4.2.3 Galliumarsenid-Solarzellen

Galliumarsenid (GaAs) ist ein Halbleitermaterial, das deutlich bessere Eigenschaften als Silizium aufweist. Galliumarsenid wandelt eine höhere Bandbreite von Licht in Energie um. Es wurden Wirkungsgrade von bis zu 25% gemessen. Solarzellen aus Galliumarsenid sind jedoch noch etwa 50-mal so teuer in der Herstellung wie ihre siliziumbasierten Pendanten. Hauptabnehmer für diesen Zellentypus sind im Moment noch Branchen, bei

---

<sup>204</sup> Vgl. Green, M. (2000): Photovoltaics - Technologically Overview. Energy Policy 28. S. 993ff

<sup>205</sup> Vgl. Falk, Dürschner, & Remmers. (2005). Photovoltaik für Profis. Berlin: Professionell & Praxisnah. S. 122

<sup>206</sup> Vgl. Luther, Preiser, & Willeke. (2003). Solar Modules and Photovoltaic Systems. Heidelberg: Springer Verlag. S. 58

denen die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes nicht im Vordergrund steht, wie etwa bei der Raumfahrt.<sup>207</sup>

#### 5.4.2.4 Wirkungsgrade

Bei Solarzellen wird unterschieden zwischen zwei verschiedenen Wirkungsgraden: dem Zellwirkungsgrad und dem Modulwirkungsgrad. Der Zellwirkungsgrad bemisst den Grad der Wirkung einer einzelnen Solarzelle. Da jedoch eine Zelle nicht leistungsstark genug ist sind einzelne Solarzellen zumeist in Module zusammengefasst. Der Modulwirkungsgrad ist auf Grund von Widerständen und Reibungsverlusten immer niedriger als der Wirkungsgrad einzelner Zellen. Für den Antrieb in Personenkraftwagen ist allerdings der Modulwirkungsgrad aussagekräftiger.

Solarzellen-Typ	Zellwirkungsgrad	Modulwirkungsgrad
Galliumarsenid	21-25%	19-23%
Monokristallin	13-17%	11-16%
Polykristallin	11-15%	10-14%
Dünnschicht	12-14%	8-10%
Amorphes Silizium	7-8%	4-7%

Tabelle 21: Wirkungsgrade von Solarzellen<sup>208</sup>

Schuld an dem doch geringen Wirkungsgrad sind physikalische Verlustmechanismen. Zum einen benötigen Solarzellen Photonen von hohem Energiezustand für den Umwandlungsprozess. Alle anderen werden von der Solarzelle nicht absorbiert. Ein absorbiertes Photon mit diesem hohen Energiezustand erzeugt nur ein einzelnes Elektronen-Loch Paar. Die überschüssige Energie wird in Form von Hitze wieder abgegeben. Dieser physikalische Effekt ist für mehr als 50% des Energieverlustes bei einem fiktiven Wirkungsgrad von 100% verantwortlich.

Weitere Verlustbringer sind die Metallkontakte auf der sonnenzugewandten Oberfläche der Solarzelle, sowie die Oberflächenstruktur der Solarzellen selbst, die einen Teil des einfallenden Lichts reflektieren. Elektrische Widerstände in der Zelle selbst, in den Kontakten und der Verkabelung sorgen für weitere Effizienzverluste. Diese Verlustbringer hängen mit der Verarbeitungsqualität und dem verwendeten Material zusammen und sind daher technisch beeinflussbar.<sup>209, 210</sup>

<sup>207</sup> Vgl. Luther, Preiser, & Willeke. (2003). Solar Modules and Photovoltaic Systems. Heidelberg: Springer Verlag. S. 60

<sup>208</sup> Vgl. Falk, Dürschner, & Remmers. (2005). Photovoltaik für Profis. Berlin: Professionell & Praxisnah. S. 121

<sup>209</sup> Vgl. Green, M. (2000): Photovoltaics - Technologically Overview. Energy Policy 28. S. 991ff

<sup>210</sup> Vgl. Würfel, P. (2008): Physik der Solarzellen, 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. S. 38ff

### 5.4.3 Bewertung des Systems

In diesem Unterkapitel wird das System der solarbetriebenen Personenkraftwagen näher untersucht und ihre Marktchancen erläutert.

#### 5.4.3.1 SWOT-Analyse der solarbetriebenen Fahrzeuge

<b>Strengths</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Der Betrieb von Solarfahrzeugen läuft komplett emissionsfrei ab</li><li>• Die Technologie der Elektromotoren ist technisch ausgereift und wartungsarm, da wenig bewegliche Teile vorhanden sind</li><li>• Da kein Treibstoff nachgefüllt werden muss sinken die Betriebskosten stark</li><li>• Man ist auf keine Versorgungsinfrastruktur angewiesen</li></ul>
<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Der Betrieb des Wagens oder das Aufladen der Batterie hängt vom Wetter ab, es kann nicht immer und überall betrieben werden</li><li>• Leistung, Aussehen, Stauraum und andere Parameter entsprechen nicht den Wünschen der Kunden</li><li>• Noch sind keine Kaufpreise bekannt</li><li>• Noch weist die Solartechnologie einen geringen Wirkungsgrad auf</li></ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Der Wirkungsgrad der Solarzellen kann durch Forschung erhöht werden, die Leistung steigt an</li><li>• Durch steigende Treibstoffpreise wird das Solarauto in sonnigen Teilen der Welt zu einer ernsthaften Alternative</li><li>• Die hohen Anschaffungskosten sinken durch die Großserienproduktion</li></ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die Wirkungsgrade können zu wirtschaftlich sinnvollen Kosten nicht erhöht werden</li><li>• Das Aussehen der Solarautos kann nicht den Wünschen der Kunden entsprechend adaptiert werden</li></ul>

#### 5.4.3.2 Versorgungsinfrastruktur für solarbetriebene Fahrzeuge

Da Solarfahrzeuge für den Normalbetrieb keinen Treibstoff brauchen fällt auch die Versorgungsinfrastruktur zum betanken weg. Zwar verfügen einige Solarautos auch über die Möglichkeit über die Steckdose mit Strom betankt zu werden, dies entspricht aber nicht den Vorstellungen der Ingenieure von einem Solarfahrzeug im Endstadium. Dieses soll rein aus der Energie der Sonne vor Ort betrieben werden.

#### 5.4.3.3 Stand der Technik

Von allen in dieser Arbeit vorgestellten alternativen Antrieben sind Solarautos noch am weitesten von einer großen, erfolgreichen Markteinführung entfernt. Bei vielen entwickelten Modellen geht es auch nicht um die Praxistauglichkeit im Alltag, sondern es soll gezeigt werden, was alles möglich ist. Dies drückt sich zum Beispiel in weltweit bekannten Marathon-Rennen aus, wie der World Solar Challenge<sup>211</sup> die jedes Jahr quer durch Australien führt.

Die Leistung von heute hergestellten, experimentellen, Solarautos kann sich nicht mit denen von herkömmlichen Verbrennungsmotoren messen. Solarautos haben oftmals nicht mehr als 2 bis 5kW, dafür aber auch nur ein Gewicht von bis zu 200 Kilogramm. Bis diese reinen Solarmobile marktreif sind werden noch Jahre vergehen. Kurzfristig werden hier Hybridmodelle auf den Markt dringen, also PKWs mit batterieelektrischen Antrieben die zusätzlich mit einem Solarpanel ausgestattet sind, wie etwa das „bluecar“ von Pininfarina in Italien, das folgende Grafik zeigt.

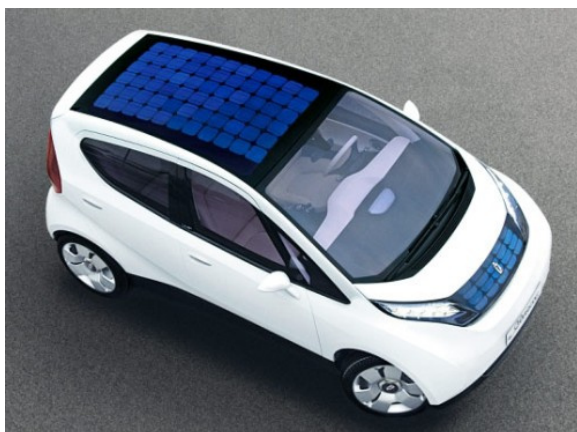


Abb. 41: Solarauto „bluecar“ von Pininfarina<sup>212</sup>

<sup>211</sup> Vgl. <http://www.worldsolarchallenge.org/> (abgerufen am 20.07.2010)

<sup>212</sup> Vgl. <http://zeitgeist.yopi.de/cool/2355/bluecar-solar-auto-von-pininfarina-schon-2010> (abgerufen am 20.07.2010)

Da reine Solarautos noch nicht reif sind für eine Markteinführung ist es auch schwer heute realistische Kaufpreise dafür anzugeben. So zum Beispiel sind für den bluecar von Pininfarina und für den FIAT Phylla, beide sollen noch 2010 ihre Markteinführung erleben, keine Verkaufspreise bekannt.

#### 5.4.4 Praxisbeispiele

Bei den Praxisbeispielen werden 2 verschiedene Konzepte vorgestellt, die auch bereits in den vorhergehenden Kapiteln kurz erwähnt wurden. Mit dem bluecar von Pininfarina und dem FIAT Phylla werden Hybridmodelle vorgestellt, die ihre Energie sowohl aus der Steckdose als auch aus Solarpanels gewinnen. Diese Technik wird noch vor reinen Solarautos auf den Markt kommen. Des Weiteren wird ein reines Solarmobil vorgestellt.

Parameter	bluecar	FIAT Phylla
Länge	3,05 m	2,99 m
Gewicht	1070 kg	750 kg
Reichweite	250 km	220 km
Batterietyp	Li-Po Batterie	Li-Po Batterie
Leistung	30 kW/41 PS	
Höchstgeschwindigkeit	120 km/h	130 km/h
Ladezeit an Steckdose	6 Stunden	4 bis 5 Stunden
% der Energie aus Solar	k.A.	circa 8%

Tabelle 22: Technische Daten bluecar und Phylla<sup>213, 214</sup>

Der BLUECAR ist ein kleines und elegantes Stadtauto mit vier Sitzplätzen und fünf Türen. Die Schaltung erfolgt selbstverständlich über ein Automatikgetriebe. Seine Batterie bietet eine Reichweite von 250 km, also weit mehr, als ein Stadtauto im Durchschnitt täglich zurücklegt, nämlich an die 40 km. Das Aufladen der Batterie kann an einer öffentlichen Anschlussstelle oder zu Hause mit einer Standardsteckdose erfolgen. Dazu sind bei einer Standardsteckdose noch 6 Stunden erforderlich, während an den zukünftigen Schnellladestationen 2 Stunden ausreichen. Bei Bedarf ist auch ein „Flash-Laden“ von 5 Minuten möglich, mit dem das Elektroauto immerhin 25 km zurücklegen kann. Ein Bild des bluecar findet sich bereits im vorigen Kapitel.

Das City-Auto FIAT Phylla wurde in Kooperation von Regierungsstellen, Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen aus verschiedenen Branchen entworfen.

<sup>213</sup> Vgl. <http://www.auto-motor.at/Auto/Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/Fiat-News/Fiat-Phylla-Elektroauto.html> (abgerufen am 20.07.2010)

<sup>214</sup> Vgl. <http://www.pininfarina.com/index/storiaModelli/Pininfarina-BlueCar.html> (abgerufen am 20.07.2010)

Der Phylla ist 2,99 Meter lang und 750 Kilogramm schwer. Das Fahrzeug hat einen aus Aluminium gefertigten Rahmen, die Karosserie besteht aus biologisch abbaubaren Kunststoffen. Wegen der auf den Außenflächen integrierten Solarpanelen und der aufladbaren Batterien gilt das Fahrzeug als besonders umweltfreundlich. Die Reichweite beträgt mit Lithium-Ionen-Batterien 145 Kilometer und bei Lithium-Polymer-Batterien 220 Kilometer. Mit dem photovoltaisch gewonnenen Strom können zwölf bis 18 Kilometer pro Tag gefahren werden. In sechs Sekunden beschleunigt Phylla von Null auf 50 Stundenkilometer und erreicht eine Spitzengeschwindigkeit von 130 Km/h. Die folgende Grafik zeigt den FIAT Phylla und seine Solarkollektoren auf der Motorhaube, auf dem Dach der Fahrgastzelle und auf den Außenseiten der Türen.



Abb. 42: FIAT Phylla<sup>215</sup>

Ein Beispiel für einen rein solarbetriebenen PKW ist der Sky Ace TIGA von der japanischen Universität Ashiya. Dieser experimentelle Solarwagen hält den Geschwindigkeitsrekord für rein solarbetriebene Autos mit einer Geschwindigkeit von 165km/h.

Parameter	Sky Ace TIGA
Länge	5,00 m
Gewicht	138 kg ohne Batterie
Reichweite	k.A.
Batterietyp	Li-Po Batterie
Leistung	5 kW/6,8 PS
Höchstgeschwindigkeit	165 km/h
Ladezeit an Steckdose	k.A.
Karosserie	Kohlefaser
Solarpanel	GaAs-Zellen

Tabelle 23: Parameter Sky Ace TIGA

<sup>215</sup> Vgl. <http://www.mundoautomotor.com/eco/wp-content/uploads/2008/11/fiat-phylla-00.jpg> (abgerufen am 20.07.2010)



Der Sky Ace TIGA fährt auf drei Reifen um den Rollwiderstand zu verringern, seine Karosserie besteht komplett aus Kohlefaser um das Gewicht so gering wie möglich zu halten. Die folgende Abbildung zeigt, dass der Sky Ace TIGA kompromisslos aerodynamisch designt wurde. Eine Markteinführung dieses Fahrzeuges ist nicht geplant, er dient rein experimentellen Zwecken.



Abb. 43: Sky Ace TIGA<sup>216</sup>

### 5.4.5 Zusammenfassung

- Solarautos weisen auf Grund des emissionslosen Betriebes, der langfristigen Verfügbarkeit der Rohstoffe und der noch im Entwicklungsstadium befindlichen Technologie ein hohes Potenzial für die Zukunft auf.
- Die Energie der Sonne steht auf der Erde, nach menschlichen Maßstäben, noch unbegrenzt lange zur Verfügung.
- Jedoch genügen die bis jetzt erzielbaren Leistungen in puncto Beschleunigung, Platzangebot und Aussehen noch nicht den Wünschen der Kunden auf dem Markt.
- Ein großer Vorteil ist, dass rein solarbetriebene PKWs keine Versorgungsinfrastruktur benötigen, da sie ihre Energie komplett aus der Sonne beziehen. Dies führt aber auch schon zu einem entscheidenden Nachteil. Sonne ist leider nicht immer und überall vorhanden. Diese PKWs können also nicht immer betrieben werden. Die mitgeführten kleinen Batterien, man muss bei Solarautos nämlich sehr stark auf das Gewicht achten, reichen heute nur für Reichweiten von bis zu 250 Kilometer.

<sup>216</sup> Vgl. [http://forum.avtoindex.com/foto/data/media/5/sky\\_ace\\_tiga\\_solar\\_car\\_1.jpg](http://forum.avtoindex.com/foto/data/media/5/sky_ace_tiga_solar_car_1.jpg) (abgerufen am 20.07.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- In anderen Regionen der Welt, etwa rund um den Äquator, wo mehr und öfter die Sonne als Energielieferant zur Verfügung steht, haben Solarmobile eine größere Marktchance als zum Beispiel in Europa und Nordamerika.
- Die verwendeten Solarpanels weisen einen noch sehr geringen Wirkungsgrad auf, viel Energie geht durch Reflexion und Reibungsverluste verloren. Leistungsfähigere Solarzellen sind allerdings noch um ein Vielfaches teurer als herkömmliche Silizium-Zellen.
- Viele heute hergestellte Solarautos funktionieren nur als Prototypen, ein Markteintritt ist mit diesen nicht geplant. Sie dienen vielmehr dazu darzustellen, was technisch möglich ist. Sie dienen als Wegweiser für die Zukunft.
- Kurzfristig werden sich am Markt vor allem Batterie/Solar-Hybridmodelle etablieren. Diese sind weiterhin auf die Steckdose zur Energieaufnahme angewiesen, haben an ihren Oberflächen aber Solarpanels, die die Betriebskosten weiter senken sollen.

## 5.5 Wasserstoff - Verbrennungsmotor

Wasserstoff ist mit einer Häufigkeit von über 92,7% das mit Abstand am häufigsten im Universum vorkommende Element.<sup>217</sup> Wasserstoff eignet sich nicht nur für den Betrieb von Brennstoffzellen sondern kann auch in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Das Prinzip des Wasserstoffverbrennungsmotors beruht auf den konventionellen Motoren, hier vor allem auf dem Ottoprinzip. Grund dafür ist die hohe Zündtemperatur von Wasserstoff (circa 560°C), weswegen sich der Wasserstoff für den Selbstentzündungsmechanismus des Dieselmotors nicht eignet. Durch Änderungen am Gemischbildungssystem, dem Brennverfahren etc. werden normale Ottomotoren für den Betrieb mit Wasserstoff oder mit anderen wasserstoffreichen Gasen adaptiert.

Die Idee Wasserstoff als Kraftstoff in Personenkraftwagen einzusetzen ist keineswegs neu, bereits in den 1930er Jahren arbeiteten Wissenschaftler mit beachtlichem Erfolg an der Umrüstung von Verbrennungsmotoren auf Wasserstoffbetrieb und an der Beimischung von Wasserstoff zu herkömmlichen Kraftstoffen zur Erhöhung der Wirkungsgrade. Der Etablierung von Wasserstoff – Verbrennungsmotoren wird kurzfristig großes Potenzial unterstellt, da die Technologie von Verbrennungsmotoren bereits seit über 100 Jahren ausgereift ist und nur überschaubare Adaptionen bei den Fahrzeugen nötig sind. Des Weiteren ist ein bivalenter Betrieb mit Wasserstoff und Benzin technisch kein Problem. Der bivalente betrieb kann auch über das noch beinahe nicht vorhandene Tankstellennetz hinweghelfen. Des Weiteren kann die Automobilindustrie bestehende Produktionseinrichtungen wie Motorenwerke weiternutzen.

Wasserstoff gilt als der ideale Treibstoff der Zukunft: Seine Herstellung ist theoretisch auf Basis der Sonnenenergie möglich oder durch Elektrolyse aus Wasser, wobei keine schädlichen Nebenprodukte entstehen. Seine Nutzung führt den Wasserstoff wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurück: in Wasser. Das Problem ist allerdings die Speicherung selbst. Wasserstoff ist gasförmig, kann also nur unter extrem hohem Druck oder bei extrem niedrigen Temperaturen effizient gespeichert werden. Darüber hinaus erfolgt die Herstellung des Wasserstoffs heute noch nicht nach den beschriebenen klimaneutralen Herstellungsmethoden. Circa 98% der jährlich produzierten 500 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff werden aus Erdgas, einem fossilen Energieträger, durch Steamreforming oder Cracking gewonnen.<sup>218, 219, 220, 221</sup>

<sup>217</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 27

<sup>218</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 161ff

<sup>219</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG49ff

<sup>220</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:36ff

<sup>221</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 207ff

## 5.5.1 Gewinnung von Wasserstoff

Wasserstoff ist kein Primärenergieträger wie Kohle, Erdöl, Erdgas, Sonnenlicht oder Wind. Wasserstoff liegt fest gebunden in Molekülen wie Wasser oder Methan vor. Es kostet zurzeit noch viel Geld und Zeit den Wasserstoff in elementarer Form zu gewinnen und zu reinigen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten aus verschiedenen Stoffen Wasserstoff zu gewinnen. Die folgenden Abschnitte erklären kurz die Methoden wie aus verschiedenen Ausgangsstoffen Wasserstoff gewonnen werden kann.<sup>222</sup>

### 5.5.1.1 Erdgas

Erdgas, oder Methan, ist die bei weitem mengenmäßig umfangreichste Quelle für Wasserstoff. Wasserstoff wird durch die sogenannte Dampfreformierung (Steamreforming) gewonnen. Diese Herstellungsmethode ist ein mehrstufiger Prozess. Bei der ersten Stufe reagiert Erdgas ( $\text{CH}_4$ ) bei sehr hohen Temperaturen (750 bis  $1.000^\circ\text{C}$ ) und hohem Druck (15 bis 25 bar) mit Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) in Röhren, die mit einem Katalysator, normalerweise Nickel, gefüllt sind. Es entstehen Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Wasserstoff. Die zweite Stufe, eine homogene Wassergasreaktion liefert durch Umsetzung von Kohlenmonoxid mit Wasserdampf  $\text{CO}_2$  und weiteren Wasserstoff. Das Gas, das die Röhren verlässt besteht aus circa 70 – 80% Wasserstoff. Das bei der Reaktion entstehende Kohlenmonoxid wird in die Atmosphäre geblasen. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Herstellungsmethode beträgt circa 70%. Die Dampfreformierung ist die mit Abstand häufigste Herstellungsmethode von Wasserstoff. SR (Steamreforming) – Anlagen werden mit zunehmender Größe immer billiger, weshalb sich kleine Anlagen für Wasserstofftankstellen nicht rentieren. Die Herstellungskosten belaufen sich bei Großanlagen auf etwa 4 bis 5 \$/ kg Wasserstoff.<sup>223 224</sup>

### 5.5.1.2 Wasser

Wasser gehört zu den leicht zugänglichen Quellen für Wasserstoff. Die Elektrolyse – die Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von elektrischem Strom – ist technisch ausgereift und wird weltweit für die Gewinnung von Reinstwasserstoff verwendet. Diese Herstellungsmethode ist allerdings sehr energieintensiv. Der Wirkungsgrad

<sup>222</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 50ff

<sup>223</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 53ff

<sup>224</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 184ff

beträgt circa 70%. Für eine Energieeinheit Wasserstoff müssen zur Herstellung 1,4 Energieeinheiten an Strom aufgewendet werden. Da elektrischer Strom aber zumeist aus fossilen Energieträgern mit einem Wirkungsgrad von circa 30% gewonnen wird sinkt der Gesamtwirkungsgrad auf 20%. Wie bei der Dampfreformierung ist auch bei der Elektrolyse die Wirtschaftlichkeit von Großanlagen höher. Die Herstellungskosten belaufen sich bei der Elektrolyse in Großanlagen auf etwa 7 bis 9 \$/ kg Wasserstoff, bei Kleinanlagen auf etwa 12 \$/ kg Wasserstoff.<sup>225, 226</sup>

### 5.5.1.3 Weitere Methoden

Auch Benzin ist eine potenzielle Wasserstoffquelle. Wasserstoff kann aus Benzin durch partielle Oxidation oder autotherme Reformierung gewonnen werden. Das wesentliche Problem hierbei besteht in der hohen Betriebstemperatur von Benzinreformern. Eine Vorwärmzeit von mindestens einer Minute beim Starten ist für viele Käufer nicht akzeptabel. Des Weiteren werden auch hier bei der Herstellung erhebliche Menge nCO<sub>2</sub> freigesetzt.

Kohle gehört zu den wichtigsten Wasserstoffquellen. Zur Gewinnung von Wasserstoff wird die Kohle in der Regel vergast, Verunreinigungen werden entfernt, der Wasserstoff wird abgetrennt. Auch dieser Prozess führt zu erheblichen CO<sub>2</sub> Emissionen. Da Kohle der am häufigsten vorkommende Energieträger auf der Erde ist wird hier daran geforscht, das CO<sub>2</sub> aufzufangen und unterirdisch zu lagern. Allerdings sind ernst zu nehmende Konsequenzen über zukünftige technische und ökologische Effekte noch nicht untersucht.

Biomasse kann mittel- und langfristig eine sehr wichtige Wasserstoffquelle werden. Viele Experten sind der Meinung, den gesamten zukünftigen Bedarf an Wasserstoff aus Biomasse decken zu können.<sup>227</sup> Biomasse in diesem Zusammenhang ist jedes gewachsene Material, vom Baum bis zu Küchenabfällen. Biomasse als Ausgangsprodukt ist vor allem hinsichtlich der globalen Erwärmung interessant, da alles bei der Verbrennung freigesetzte CO<sub>2</sub> vorher aus der Atmosphäre fixiert wurde, wodurch die Nettoemission null ist. Biomasse kann ähnlich wie Kohle vergast werden zur Herstellung von Wasserstoff. Bei diesem Verfahren kann circa 93% Nutzenergie erreicht werden.

Auch aus Kernkraftwerken kann Wasserstoff gewonnen werden. Eine Möglichkeit ist die Herstellung mittels Elektrolyse, der Strom würde aus dem Kernkraftwerk selbst stammen. Weitaus vielversprechender ist allerdings die thermochemische Spaltung bei hohen Temperaturen von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Die Gewinnung von Wasserstoff

---

<sup>225</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 55ff

<sup>226</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 207ff

<sup>227</sup> Vgl. Tetzlaff, K.H. (2005). Bio-Wasserstoff – Eine Strategie zur Befreiung aus der selbstverschuldeten Abhängigkeit vom Öl. Norderstedt: Books on Demand GmbH S. 167ff

aus Photovoltaik-Anlagen wird auch langfristig noch keine echte Alternative darstellen können, zu hoch sind die Kosten, zu gering ist der Wirkungsgrad.

Die Gewinnung von Wasserstoff aus Solarzellen ist laut Tetzlaff (2008) in allen dichtbesiedelten Gebieten, auch in Österreich, möglich, denn die dichte Besiedelung lässt auf gute landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten schließen. Kurz gesagt, die Leute siedelten sich früher dort an wo Getreide wuchs, und dies lässt auf ausreichend Sonne schließen. Die energietechnisch vernünftige Gewinnung von Wasserstoff aus Sonnenenergie ist aber erst mittel- bis langfristig zu erwarten.<sup>228</sup>

Nur theoretisch funktioniert zurzeit die Gewinnung von Wasserstoff aus Hochtemperatur-Brennstoffzellen selbst.<sup>229</sup>

### 5.5.2 Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff bringt viele Probleme mit sich. Unter den meisten Bedingungen hat Wasserstoff ein wesentlich geringeres Energie-Volumen-Verhältnis als andere Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, Methan, Propan und Methanol. Wasserstoff enthält wesentlich weniger Energie pro Volumeneinheit als vergleichbare Kraftstoffe bei gleichem Druck. Bei Raumtemperatur und Druck nimmt Wasserstoff ein etwa 3.000-mal größeres Volumen als Benzin mit gleichem Energiegehalt. Wasserstoff lässt sich flüssig oder unter Druck speichern. Der Metallhydrid-Speicherung und der Speicherung in Kohlenstoff-Nanoröhren werden erst langfristig ernsthafte Alternativen darstellen.<sup>230</sup>

#### 5.5.2.1 Flüssige Speicherung

Die flüssige Speicherung ist die am häufigsten verwendete Speicherung. Flüssigkeiten besitzen gegenüber Gasen entscheidende Vorteile: sie verfügen über eine höhere Energiedichte und sind leichter zu transportieren und zu handhaben. Wasserstoff wird allerdings bei Atmosphärendruck erst bei  $-253^{\circ}\text{C}$  flüssig, wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die Speicherung erfolgt in superisolierten, sogenannten kryogenen, Tanks. Die Verflüssigung erfolgt in mehreren Kühlungs- und Verdichtungsprozessen. Die Abkühlung ist sehr kostenintensiv, man benötigt teure Ausrüstung, auch der Wirkungsgrad von Kühlprozessen ist sehr energieintensiv. 40% der Energie des Wasserstoffs müssen aufge-

---

<sup>228</sup> Vgl. Tetzlaff, K.H. (2008). Wasserstoff für alle – Wie wir der Öl-, Klima-, und Kostenfalle entkommen. Nordstedt: Books on Demand GmbH. S.:195ff

<sup>229</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 56ff

<sup>230</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 69ff

wendet werden um ihn zu Verflüssigen. Ein weiteres Problem der Verflüssigung ist die Verdampfung. Ein experimenteller Tank von General Motors hat eine Verdampfungsrate von 4% am Tag. Flüssigwasserstofftanks sind in ihrer Form flexibel und lassen sich bequem in Personenkraftwagen einbauen.<sup>231, 232</sup>

### 5.5.2.2 Druckspeicherung

Mit verdichtetem Wasserstoff werden die meisten PKW-Prototypen betrieben. Der technische Vorgang der Druckspeicherung ist einfach und ausgereift. Im Vergleich zur flüssigen Speicherung ist die Druckspeicherung billig. Selbst bei hohen Drücken ist die Energie pro Volumeneinheit geringer als bei Benzin. Je höher der Druck ist desto mehr Kraftstoff passt in eine gegebenes Volumen und desto höher ist die Energiedichte. Allerdings steigt mit dem Druck auch der Energieaufwand. Circa 10 bis 15% des nutzbaren Energiegehalts wird für die Verdichtung aufgebracht. Die wesentlichen technischen Herausforderungen sind das Gewicht und das Volumen des Tanks. Durch hohen Druck im Tank lässt sich das Volumen verringern, allerdings ist auch bei heute üblichen Hochdrucktanks das Volumen immer noch circa viermal größer als ein Benzintank mit derselben Reichweite. Ein weiteres Problem ist die Form des Tanks. Um dem hohen Druck stand zu halten muss er mit heutigen Werkstoffen zylindrisch oder rund sein. Dies lässt wenig Spielraum für den flexiblen Einbau in Personenkraftwagen.<sup>233, 234</sup>

### 5.5.3 Chemische Eigenschaften

Wie jeder Stoff kann Wasserstoff in den drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig vorkommen. Wasserstoff ist bei Raumtemperatur ein farbloses und geruchloses Gas, etwa vierzehnmal leichter als Luft. Wasserstoff ist das leichteste Gas. Wasserstoff hat die besten Wärmeleitfähigkeiten aller Gase weil sich die leichten Wasserstoff-Moleküle schneller bewegen als alle anderen.

---

<sup>231</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 70ff

<sup>232</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 209ff

<sup>233</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 72ff

<sup>234</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 209ff

Eigenschaften des Wasserstoffs bei Normalbedingungen (0°C und 1bar Druck)	
Brennwert	142 MJ/kg (39,44 kWh/kg)
Heizwert	120 MJ/kg (33,33kWh/kg)
Schmelztemperatur	-259,35°C
Dichte gasförmig	0,009kg/m <sup>3</sup>
Dichte flüssig	77kg/m <sup>3</sup>
Zündgrenzen	4 Vol% - 75,6 Vol%

Tabelle 24: Eigenschaften von Wasserstoff<sup>235</sup>

Das Wasserstoffatom ist das kleinste und einfachste Atom, es besteht aus einem Proton im Kern und wird von einem Elektron umkreist. Es ist das erste Element im Periodensystem mit der Ordnungszahl 1. Wasserstoff ist bei Raumtemperatur beständig und wenig reaktiv, in Gemischen mit Luft, Sauerstoff und Chlorgas reagiert Wasserstoff explosionsartig. Bei höheren Temperaturen reagiert Wasserstoff unter Hybridbildung teils heftig mit Metallen und Nichtmetallen.<sup>236</sup>

#### 5.5.4 Funktionsweise des Wasserstoff - Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor entspricht in der technischen Konzeption dem normalen Diesel- oder Ottomotor. Die Gemischbildung erfolgt entweder außen oder innen. Bei der äußeren Gemischbildung vermischt sich das Gas noch vor dem Eintritt in den Verbrennungsraum. Im Zylinder wird das Gemisch von einer Zündkerze oder einer anderen Zündquelle fremdgezündet. Bei der inneren Gemischbildung wird gasförmiger Wasserstoff unter hohem Druck in den Zylinderraum geleitet, vermischt sich dort mit der Luft und wird anschließend fremdentzündet. Die Selbstentzündung des Gemischs im Brennraum ist aufgrund der zu geringen Temperaturen problematisch.

Im Motorraum und an den anderen Aggregaten im PKW müssen Adaptionen vorgenommen werden. So zum Beispiel müssen heiße Stellen im Zylinder vermieden werden, da sich das Wasserstoff-Gemisch sonst zu früh entzündet. Da Wasserstoff über schlechte Schmiereigenschaften verfügt, es fehlt der Kohlenstoff, muss das Motoröl alleine zur Verschleißminderung beitragen. Des Weiteren müssen verschleißfeste Kolbenringe und eine

<sup>235</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 35ff

<sup>236</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 40ff



Graphitierung der Ventilschäfte vorgenommen werden. Auch sämtliche Treibstoffleitungen und Pumpen müssen adaptiert werden.<sup>237, 238</sup>

### 5.5.5 Sicherheit von Wasserstoff

Wasserstoff hat gegenüber Benzin und Diesel sicherheitstechnische Vorteile. Wenn ein Benzintank undicht ist oder platzt verspritzt der Treibstoff und bildet leicht entzündliche Pfützen, oder es verspritzt, wodurch sich ein Brand leicht ausbreiten kann. Wasserstoff hingegen verschwindet als sehr bewegliches Gas in der Atmosphäre. Wasserstoff ist auch für die Fauna und Flora keine Belastung, des Weiteren ist es ungiftig.

Andererseits hat der Wasserstoff auch sehr gravierende sicherheitstechnische Nachteile gegenüber Benzin und Diesel. Der Wasserstoff ist über einen sehr weiten Konzentrationsbereich entflammbar, und seine Entzündenergie ist gering, etwa 20mal niedriger als die von Benzin oder Erdgas. Für die Entzündung von Wasserstoff können bereits die Benützung eines Handys oder kilometerweit entfernte Gewitter und deren elektrostatische Aufladungen führen. Die folgende Grafik vergleicht zündungsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff und Benzin.

	Wasserstoff	Benzin
Untere Explosionsgrenze <sup>239</sup>	4 Vol%	0,6 Vol%
Obere Explosionsgrenze	75,6 Vol%	8 Vol%
Flammpunkt <sup>240</sup>	-270,8 °C	>-20 °C
Zündtemperatur <sup>241</sup>	585 °C	240-500 °C
Minimale Zündenergie	0,017 mJ	0,8 mJ

Tabelle 25: Zündungsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff und Benzin<sup>242</sup>

Die Grafik zeigt, dass der einzig gravierende Unterschied zwischen Benzin und Wasserstoff in dem hohen Entzündungsbereich liegt.

Lecks in Wasserstofftanks sind demzufolge ein erhebliches Sicherheitsrisiko, verschlimmert werden die Auswirkungen noch durch die Fähigkeit des Wasserstoffs bereits aus

<sup>237</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:36ff

<sup>238</sup> Vgl. Cornel, S. (2008). Alternative Antriebe für Automobile. Heidelberg: Springer Verlag S.: 216ff

<sup>239</sup> Als Explosions- oder Zündgrenzen bezeichnet man den Bereich in dem dieser Stoff mit Luft gemischt entzündlich ist wenn mindestens die minimale Zündenergie zugeführt wird.

<sup>240</sup> Der Flammpunkt ist die niedrigste Flüssigkeitstemperatur bei der sich unter festgelegten Bedingungen Dämpfe in solcher Menge entwickeln, dass über dem Flüssigkeitsspiegel ein durch Fremdentzündung entzündbares Dampf-Luft-Gemisch entsteht.

<sup>241</sup> Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur bei der eine selbstständige Entzündung in einem offenen Gefäß stattfindet.

<sup>242</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 257

mikroskopisch kleinen Rissen zu entkommen. Aus jedem Flüssigwasserstofftank verdunstet täglich eine kleine Menge. Deswegen gelten für die Handhabung von Wasserstoff strengen Vorschriften. Sehr gute Belüftungen in Gebäude einzubauen oder feuerfeste Ausrüstungen anzuschaffen ist teuer. Undichte Leitungen und Lecks werden bei anderen geruchs- und farblosen Gasen unter anderem mittels Riechstoffen identifiziert. Bei Wasserstoff ist das unmöglich, da dies die Lebensdauer des Motors oder der Brennstoffzelle verkürzen würde. Außerdem ist es leicht möglich, dass die größeren Riechstoff-Moleküle nicht durch das mikroskopisch kleine Leck entweichen können.

Ein weiteres Sicherheitsproblem ist, dass die Wasserstoffflamme beinahe unsichtbar verbrennt. Es gibt zahlreiche Fälle in denen Menschen in eine unsichtbare Wasserstoffflamme geraten sind. Die Flamme kann mittels UV- und Infrarotstrahlung sichtbar gemacht werden, doch auch diese Technologie ist teuer und nur sehr selten schnell bei der Hand. Ein „praktikable“ Lösung schlug zu diesem Thema eine amerikanische Firma vor: Wenn eine Wasserstoffflamme vermutet wird solle man mit einem Blatt Papier vor sich durch den Raum gehen. Die Flamme würde dann zuerst das Papier entzünden und man selbst würde nicht zu Schaden kommen. Auch die NASA schlägt in diesem Zusammenhang Reisigbesen als Detektoren vor.

Jeder Wasserstofftank steht unter sehr hohem Druck und ist natürlich ein Risiko an sich. Wenn ein Tank platzt darf er nicht erschüttert werden, und der Tankstoff darf sich nicht entzünden. Hier werden in Zukunft vor allem Polymer-Tanks zur Verwendung kommen. Auch Metallhybrid-Systeme, bei denen die Wasserstoffatome an Metall-Moleküle gebunden werden, verhindern das Entweichen bei mikroskopisch kleinen Lecks.

Um die Gefährlichkeit des Wasserstoffs objektiv betrachten zu können muss man allerdings auch mit einbeziehen, dass Unfälle mit LKWs und auch mit Tanklastzügen sowohl bei Diesel als auch Benzin an der Tagesordnung stehen. Die folgende Bildreihe zeigt einen Test von Wasserstoff- und Benzintanks. In beide Tanks wurden 1,6 mm große Öffnungen gebohrt, die Tanks anschließend in Brand gesteckt. Die Bilder wurden nach 0, nach 3, nach 60, nach 90, nach 140 und nach 160 Sekunden aufgenommen.

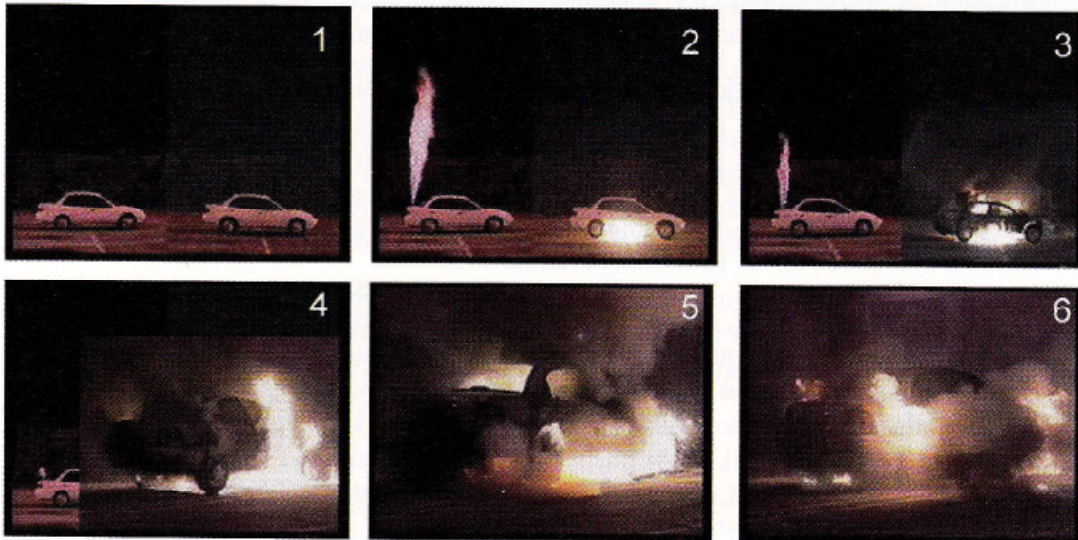


Abb. 44: Brandtestreihe für Wasserstoff- (links) und Benzin- (rechts) Tanks.

Nach 140 Sekunden (5 Bild) ist der Wasserstofftank sicher ausgebrannt, während der Benzintank und mittlerweile auch das ganze Auto in Flammen stehen. Da Wasserstoff im Gegensatz zu Benzin und Diesel nicht verspritzt sind Ausbreitungen des Brandherdes nahezu unmöglich.

Für einen neuen Kraftstoff wie Wasserstoff der noch nicht in das Alltagsbewusstsein der Kunden übergetreten ist, sind Unfallmeldungen allerdings weitaus schlechter, da diese in dem frühen Stadium Ängste und Vorurteile schüren.<sup>243, 244</sup>

## 5.5.6 Bewertung des Systems

### 5.5.6.1 SWOT-Analyse des Wasserstoff-Verbrennungsmotors

<b>Strengths</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei der Gewinnung von Wasserstoff aus natürlichem Wasser (H<sub>2</sub>O) sind die Energievorräte nahezu unbegrenzt. Denn als Abfallprodukt entsteht wieder Wasserdampf.</li> <li>• Die Gewinnung von Wasserstoff kann beinahe überall auf der Welt erfolgen</li> <li>• Die Verbrennung von reinem Wasserstoff erzeugt keine Abgase sondern nur Wasserdampf</li> <li>• Die Verbrennung in einem Motor und der Betrieb von einer Brennstoffzelle sind sehr Geräuscharm</li> </ul>

<sup>243</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 256ff

<sup>244</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 77ff

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Wasserstoff erzielt einen hohen Wirkungsgrad
- Bivalenter Betrieb mit Benzin ist möglich
- Die Technik des Verbrennungsmotors ist auch bei Betrieb mit Wasserstoff ausgereift
- Die Umbaumaßnahmen sind technisch ausgereift und an Fahrzeugen relativ leicht durchzuführen

### **Weaknesses**

- Sehr weiter Entzündungsbereich
- Bei der Herstellung von Wasserstoff ohne alternative, regenerative, Energien wird die gleiche Menge an Treibhausgasen freigesetzt wie bei gewöhnlichen Kraftstoffen
- Unausgebaute Infrastruktur, sowohl Tankstellen als auch Transport und Logistik
- Technik zum heutigen Zeitpunkt noch unausgereift
- Verdichtung, Verflüssigung, Lagerung und Transport sind sehr energieintensiv
- Bei Lagerung an Bord in gasförmigen Zustand sind die Reichweite nicht mit Benzin und Diesel vergleichbar
- Das Gas ist farb- und geruchlos, die Flamme so gut wie unsichtbar
- Der eingebaute Tank ist groß und schwer. Bei Hochdrucktanks ist die Form zylindrisch, was im Inneren des Fahrzeuges viel Platz benötigt. Kryotanks sind in ihrer Form flexibel.
- Der Tankvorgang dauert lange
- Die Belieferung der Tankstellen benötigt bei gleicher Menge mehr LKWs und Tanklastzüge, da die Energiedichte von Wasserstoff viel niedriger ist als von Benzin und Diesel
- Wasserstoff verdampft aus den Tanks und Pipelines
- Parken ist nicht überall möglich

### **Opportunities**

- Die kostengünstigere Herstellung aus regenerativen Energien könnte für eine Wasserstoff-Wirtschaft der Durchbruch sein
- Neue Technologien ermöglichen kleinere Tanks, höhere Reichweiten und eine Verkürzung des Tankvorganges
- Die Herstellung von Wasserstoff wird auch für Kleinanlagen an Tankstellen durch technologischen Fortschritt effizient

### **Threats**

- Vorurteile die seit der Katastrophe mit dem Zeppelin Hindenburg bestehen konnten bis jetzt nicht abgebaut werden
- Tankvorgänge können nicht optimiert werden

- Die effiziente Gewinnung aus regenerativen Energien dauert auf Grund technologischer Probleme noch länger als erwartet

### 5.5.6.2 Versorgungsinfrastruktur

Eine vernünftige und leistungsstarke Versorgungsinfrastruktur von Wasserstoff kann viele verschiedene Formen annehmen und ihre Ausgestaltung hängt davon ab, welche Wasserstoff-Technologie sich durchsetzt. Wenn sich Benzin-Reformer, Autos in denen aus Benzin an Bord Wasserstoff gewonnen wird, durchsetzen ändert sich an dem heutigen Tankstellennetz nichts, allerdings würde diese Technologie langfristig nicht funktionieren, da hierbei der Wasserstoff wieder aus fossilen Energieträgern gewonnen wird von denen man ja versucht in den nächsten Jahrzehnten loszukommen.

Des Weiteren kann Wasserstoff in den Tankstellen in den Städten und entlang der Fernstraßen produziert werden. Die kleinräumige Produktion ist allerdings im Vergleich zur Großproduktion in riesigen Werken erheblich teurer, allerdings werden die Transport- und Logistikkosten beinahe vollständig eingespart. Da Wasserstoff eine sehr geringe Dichte aufweist können Tanklastzüge und LKWs allerdings nur verhältnismäßig geringe Mengen Wasserstoff transportieren, was die Transportkosten zusätzlich steigen lassen würde. Des Weiteren würde die Zahl der benötigten LKWs und Tanklastzüge stark ansteigen um den Wasserstoffbedarf an den Tankstellen zu decken. Dies führt zu einer zusätzlichen Belastung der bestehenden Straßen- und Schieneninfrastruktur.

Die Herstellung von Wasserstoff für den persönlichen Verbrauch zu Hause ist aus Kostengründen derzeit noch schlicht unmöglich und wird, wenn überhaupt, erst langfristig eine Alternative. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über Wasserstoff-Tankstellen in Europa und deren Betriebsstatus. Zurzeit gibt es in Europa etwa 40 Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb, circa 30 neue Tankstellen sind derzeit in Planung und circa 20 haben den Betrieb wieder eingestellt.

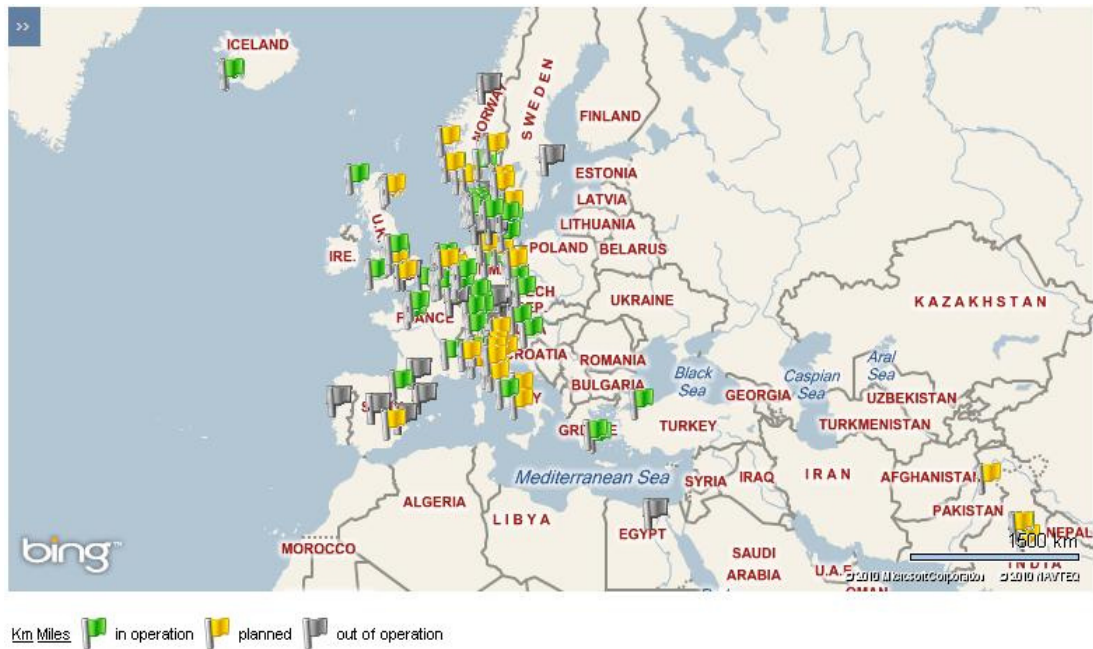


Abb. 45: Wasserstoff-Tankstellennetz in Europa<sup>245</sup>

Letztendlich, und auch die wahrscheinlichste Variante, wird Wasserstoff als Fahrzeugtreibstoff in Großanlagen nahe an möglichen Energiequellen wie Wind- und Wasserkraftwerken erzeugt werden.

Da Wasserstoff über eine sehr geringe Energiedichte verfügt müssen die Versorgungstanks an Tankstellen sehr große Dimensionen aufweisen. Die Größe in Kombination mit dem Druck dem standgehalten werden muss sorgt für hohe Kosten in der Anschaffung und im Einbau. Zur Belieferung der Tankstellen stehen LKWs und Züge bereit, die heute für den Transport von Wasserstoff bevorzugt werden. Rund die Hälfte der Energie des Wasserstoffs einer Lieferung wird für die Verdichtung und für die Drucklagerung in der Tankstelle aufgewendet. Pipelines zur Belieferung von Großabnehmern gibt es derzeit nur in Industrie-Ballungszentren, weltweit gibt es derzeit Pipelines mit einer Länge von einigen tausend Kilometern. Wasserstoff-Pipelines sind im Vergleich zu Pipelines für Erdöl oder Erdgas sehr teuer, unter anderem deswegen, weil Wasserstoff leicht durch Rohrwände diffundiert, leicht aus kleinen Lecks entweicht und mit vielen Metallen reagiert, zum Beispiel Stahl, und diese spröde macht. Ein Kilometer Wasserstoff-Pipeline kostet derzeit circa 500.000 Euro.<sup>246 247</sup>

### 5.5.6.3 Verfügbarkeit der Ressourcen

<sup>245</sup> Vgl. <http://www.h2stations.org/> (abgerufen am 09.06.2010)

<sup>246</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 69ff

<sup>247</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 85ff

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) ist das häufigste Element auf der Erde und auch im gesamten Weltall. Reiner Wasserstoff ist in freiem Zustande in der Natur nur spurenweise in der Atmosphäre, in Vulkangasen und eingeschlossen in Mineralien und Gesteinen enthalten. Da Wasserstoff sehr reaktionsfreudig ist, liegt es zumeist gebunden im Wasser, in Säuren und Basen vor. Wasserstoff ist nach dem Kohlenstoff das wichtigste Element fast aller organischen Verbindungen.

Wasserstoff als Treibstoff für Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen kann somit beinahe unendlich auf der Erde generiert werden. In der Brennstoffzelle, wo reiner Wasserstoff, aus Wasser gewonnen, mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht wird ist das Abfallprodukt wieder Wasser. Dieser Kreislauf kann also praktisch unendlich fortgesetzt werden.

### 5.5.6.4 Parken in Garagen

Für die Benützung von Garagen mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen treffen die Bestimmungen für gasbetriebene Fahrzeuge zu. Die Benutzung von Garagen ist in jedem Bundesland unterschiedlich, enthalten sind allerdings zumeist gleichbedeutende Bestimmungen. Exemplarisch aufgeführt ist hier der § 85 des Steiermärkischen Baugesetzes (Stmk. BauG.):

*(1) Für Garagen zum Abstellen von Kraftfahrzeugen, die mit Flüssiggas oder Erdgas betrieben werden, gelten zusätzlich folgende Vorschriften:*

- *sie dürfen nicht unter Aufenthaltsräumen liegen,*
- *es sind nur Heizungen zulässig, die Oberflächentemperaturen von höchstens 120 Grad Celsius erreichen können,*
- *die Lüftung muss so beschaffen sein, dass austretendes Gas gefahrlos ins Freie abgeleitet wird, und*
- *die Fußböden müssen über der Geländeoberfläche liegen.*

*(2) Kraftfahrzeuge, die mit Flüssiggas betrieben werden, dürfen in Garagen, die die Erfordernisse des Abs. 1 nicht erfüllen, nicht abgestellt werden. Auf dieses Verbot muss bei der Zufahrt gut lesbar und dauerhaft mit dem Wortlaut „Einfahrt mit flüssiggasbetriebenen Fahrzeugen verboten“ hingewiesen werden.<sup>248</sup>*

---

<sup>248</sup> Vgl. Steiermärkisches Baugesetz i.d.F. LGBl. Nr. 13/2010, § 85

#### **5.5.6.5 Rechtliche Aspekte**

Der gefahrlose Umgang mit Wasserstoff setzt die Kenntnis seiner Eigenschaften und die Beachtung zweckmäßiger Sicherheitsmaßnahmen voraus. Diese Maßnahmen sind in einer Vielzahl nationaler und internationaler Normen geregelt.

Es gibt eine Vielzahl an nationalen (ÖNORM) und internationalen (ISO) Normen. Wasserstoff als leichtentzündliches und gefährliches Gas ist der Inhalt zahlreicher Normen (Auswahl):

*ISO/TR 15919*

Sicherheitsaspekte von Wasserstoff-Systemen

*ISO 13985*

Flüssiger Wasserstoff – Landfahrzeugtreibstofftanks

*ÖNORM EN 1252*

Kryo-Behälter – Werkstoffe: Anforderungen an die Zähigkeit bei tiefen Temperaturen

*ISO 13984*

Flüssiger Wasserstoff – Landfahrzeugbefüllungsschnittstelle

*ÖNORM EN 10229*

Bewertung der Beständigkeit von Stahlerzeugnissen gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung

#### **5.5.7 Praxisbeispiele und Betriebskosten**

Die Idee von wasserstoffbetriebenen Personenkraftwagen ist nicht neu. Bereits 1807 wurde der erste Verbrennungsmotor von Isaac de Rivaz patentiert der mit Wasserstoff angetrieben wurde. Erste Fahrversuche 1813 gelangen über eine Länge von einigen hundert Metern. Auch das Hippomobile von Lenoir wurde 1822 mit Wasserstoff betrieben.

Bei der Entwicklung von modernen Prototypen von Wasserstofffahrzeugen haben sich Mitte der 1970er Jahre 3 Hersteller und Forschungsstationen hervorgetan: das Musashi Institute of Technology von der Tokyo City Universität und die deutschen Autohersteller BMW und Mercedes Benz. Bis 1988 absolvierte eine Testflotte von Mercedes-Benz Fahrzeugen in Berlin über 1 Million Kilometer. Die Wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge gingen allerdings nie über den Status eines Prototyps hinaus. Erst 2007 baute BMW eine Klein-



serie von circa 100 Fahrzeugen der BMW Hydrogen 7 Serie mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor.<sup>249</sup>

Eine mögliche Kleinserienproduktion von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren stellte 2009 der italienische Autohersteller FIAT vor. Der FIAT Panda Aria bietet bei einer Länge von 3538mm und einer Breite von 1589mm 4 Passagieren Platz. Angetrieben wird er von einem Verbrennungsmotor mit einer Leistung von 68 kW bei 0,9Liter Hubraum. Als Treibstoff kommt Hythane zur Verwendung. Dieses Gemisch besteht zu 20% aus Wasserstoff und zu 80% aus Erdgas. Der Panda Aria stößt nur 69g CO<sub>2</sub> je Kilometer aus. Wann genau die Serienproduktion beginnt und wie hoch der Verkaufspreis sein soll ist leider noch nicht bekannt.



Abb. 46:Fiat Panda Aria<sup>250</sup>

Der 2008 vorgestellte Mazda5 Hydrogen RE Hybrid soll noch 2010 in Kleinserienproduktion gehen. Das Fahrzeug verfügt über eine neue Generation des Wasserstoff-Kreiskolben-beziehungsweise Wankelmotors in Verbindung mit einem Hybridsystem, das die Leistung des Antriebs um 40 Prozent steigert und die Reichweite auf 200 Kilometer verdoppelt. Der Mazda5 Hydrogen RE Hybrid ist das weltweit erste Fahrzeug mit Wasserstoff-Hybridantrieb, das sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden kann. Der Mazda5 Hydrogen RE Hybrid kombiniert den Wankelmotor mit einem Elektromotor, der die Leistung und die Reichweite des Fahrzeugs erheblich steigert. Zu den weiteren neuen Umwelttechnologien im Fahrzeug zählen die Mazda Biotech-Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen. Diese Kunststoffe auf Pflanzenbasis werden für einige der Plastikkomponenten im Interieur sowie für die Sitzbezüge verwendet und tragen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Ein Verkaufspreis für die Kleinserie wird nicht bekanntgegeben, da das Auto nur an Leasingkunden in Japan verkauft wird.

<sup>249</sup> Vgl. Eichlseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 15ff

<sup>250</sup> Vgl. <http://www.umwelt.fiat.de/> (abgerufen am 09.06.2010)

	Mazda5 Hydrogen RE Hybrid
Länge	4.595mm
Breite	1.745mm
Höhe	1.620mm
Sitze	5
Motor-Typ	Wasserstoff-Benzin Kreiskolbenmotor
Kraftstoffart	Wasserstoff und Benzin, Elektromotor
Leistung	110 kW/150PS
Typ	Synchronmotor, Generator
Batterie	Lithium-Ionen Batterie

Tabelle 26: Mazda5 Hydrogen RE Hybrid Spezifikationen<sup>251</sup>

Der deutsche Autohersteller baut mit dem BMW Hydrogen 7 erstmals eine Kleinserie. Der BMW wird von einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor angetrieben. Auch beim BMW ist der bivalente Betrieb mit Wasserstoff und Benzin möglich. Der Wechsel zwischen den beiden Kraftstoffen ist verzögerungsfrei jederzeit möglich. Der BMW verfügt über eine Leistung von 191kW/260 PS. Der Motor erzeugt ein Drehmoment von 390 Newtonmeter bei 4.300 Umdrehungen/Minute. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 230 km/h. Die Gesamtreichweite beträgt 700 Kilometer, davon 200 km im Wasserstoffbetrieb und 500 km im Benzinbetrieb. Die folgende Grafik zeigt den BMW Hydrogen 7.



Abb. 47: BMW Hydrogen 7<sup>252</sup>

<sup>251</sup> Vgl. <http://www.motor-talk.de/news/mazda5-hydrogen-re-hybrid-im-praxistest-t1893917.html> (abgerufen am 09.10.2010)

<sup>252</sup> Vgl. <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/124503> (abgerufen am 09.06.02010)

Bei einer reinen Wasserstoff-Auslegung lässt sich das Leistungspotenzial nahezu verdreifachen. Die erste Generation wurde nur als Studie präsentiert. In der zweiten Generation wurde das vorerst auf 100 Stück limitierte Modell, welches nicht verkauft, sondern nur verleast werden soll in Dingolfing gefertigt. Die 100 produzierten Einheiten wurden teilweise an Prominente, Politiker und zur Nutzung übergeben. Ein Teil der Flotte wird bei öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen als Fahrdienst eingesetzt. So sind in Berlin ständig zwischen fünf und zehn Fahrzeuge im Einsatz, die an den beiden Wasserstoff-Tankstellen am Messedamm und an der Heerstraße betankt werden.

Die Betriebskosten sind, allein schon wegen der Ausmaße und der Motorisierung des Fahrzeuges sehr hoch im Vergleich zu kleinen Stadtautos. Die folgende Tabelle verschafft einen Überblick über die Betriebskosten.

Modell	BMW Hydrogen 7
Motorisierung	Verbrennungsmotor
Energieträger	Wasserstoff und Benzin
Preis je kg Wasserstoff	€ 8,00
Preis je Liter Benzin	€ 1,19
Kaufpreis	k.A.
Verbrauch Wasserstoff	4kg/100km
Verbrauch Benzin	14,8 l/100km
Reichweite	insgesamt 700 km
Tank Benzin	74 Liter
Tank Wasserstoff	8 Kilogramm
CO <sub>2</sub> -Ausstoß	k.A.
Kosten "Volltanken"	€ 152,06
Kosten 100 km Wasserstoff	€ 32,00
Kosten 100 km Benzin	€ 17,61

Tabelle 27: Betriebskosten BMW Hydrogen 7253

### 5.5.8 Zusammenfassung Wasserstoff-Verbrennungsmotor

- Der große und entscheidende Vorteil der Wasserstoff-Technologie ist der, dass der verwendete Rohstoff, Wasser, so gut wie unbegrenzt auf der Erde vorkommt. Zwar

<sup>253</sup> Vgl.

[http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficient\\_dynamics/phase\\_2/clean\\_energy/bmw\\_hydrogen\\_7.html](http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficient_dynamics/phase_2/clean_energy/bmw_hydrogen_7.html) (abgerufen am 08.07.2010)

kann Wasserstoff auch aus Erdöl, Kohle und anderen nicht-regenerativen Energieträgern gewonnen werden, die Herstellung wird sich allerdings auf Wasser, Windenergie und Biomasse konzentrieren.

- Die Technik des Verbrennungsmotors ist auf Grund der jahrzehntelangen Forschung und Weiterentwicklung ausgereift, auch die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff ist technisch ausgereift. Durch bivalenten Betrieb mit Wasserstoff und Benzin kann die Reichweite entscheidend erhöht werden und kurzfristig die negativen Auswirkungen des kaum ausgebauten Wasserstoff-Tankstellennetzes abgefedert werden.
- Ein weiterer Vorteil von Wasserstoff ist die emissionsfreie Verbrennung. Durch den Betrieb entsteht nur Wasserdampf. Auch der Lärmpegel ist durch die bessere Verbrennung geringer.
- Die Wasserstoff-Technologie hat aber nicht nur Vorteile sondern zum jetzigen Zeitpunkte auch noch gravierende Nachteile, die allerdings durch technischen Fortschritt hoffentlich behoben werden können. Die Herstellung von Wasserstoff, die Speicherung, der Transport und die Verdichtung sind sehr energieintensiv. Wasserstoff verdampft auch in geschlossenen Behältern. Die Verdichtung oder Verflüssigung benötigt circa 40% des Energiegehalts der verdichteten Menge. Die Energieintensität ist aus chemischen und physikalischen Gründen nicht zu vermeiden, es können lediglich die Kosten gesenkt werden.
- Auf Grund der geringen Dichte von Wasserstoff kann ein LKW oder eine Zuggarnitur nur eine geringe Menge transportieren. Um den steigenden Bedarf zu decken werden also mehr LKWs benötigt. Wasserstoff-Pipelines sind sehr teuer in der Anschaffung, auch verdampft der Wasserstoff aus den Röhren.
- Wasserstoff kann derzeit effizient und gewinnbringend nur in Großanlagen hergestellt werden, dies treibt die Transportkosten zu den Tankstellen in die Höhe. Die Herstellung in Kleinanlagen oder im Auto selbst ist vermutlich erst mittelfristig effizient.
- Bei der Bevölkerung bestehen große Bedenken in puncto Gefährlichkeit von Wasserstoff. Diese sind teilweise auch gut begründet. Wasserstoff ist sehr leicht entzündlich, ist geruchs- und farblos. Eine Wasserstoffflamme ist mit freiem Auge kaum sichtbar da sie auf Grund des fehlenden Kohlenstoffs im UV-Bereich verbrennt. Allerdings hat Wasserstoff bei Unfällen mit Bränden auch Vorteile. Im Gegensatz zu Benzin und Diesel verspritzt der Wasserstoff beim Verbrennen nicht sondern verflüchtigt sich in der Luft oder verbrennt sauber. Unfälle bei denen das ganze Auto in Flammen steht sind so gut wie ausgeschlossen.
- Die heute zur Verfügung stehenden Tanks, sowohl Hochdruckbehälter als auch Kryo-Behälter, sind sicher, die Technologie ist ausgereift. Allerdings sind in Zukunft noch leistungsfähigere Tanks notwendig um die von den Kunden gewünschte Erreichbarkeit

sicherzustellen. Der Einbau des Tanks, vor allem im bivalenten Betrieb, braucht auf Grund seiner zylindrischen Form viel Platz und verkleinert den Stauraum immens.

- Die Herstellung in Großserie von Personenkraftwagen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren hat bis jetzt noch kein Hersteller gewagt. Obwohl die Technik für die Serienproduktion bereits ausgereift ist sprechen einige Punkte noch gegen eine Großserienproduktion. Die fehlenden Tankstellen machen vor allem bei monovalentem Betrieb spontanes Fahren, ohne vorher nach Tankstellen zu suchen, unmöglich. Auch sind die Kosten in der Produktion und somit auch in der Anschaffung noch deutlich zu hoch.
- Mittel- bis langfristig soll laut Meinung zahlreicher Experten der Bedarf an Wasserstoff nur noch aus Biomasse gewonnen werden. Das dafür vorhandene Potenzial ist vorhanden, einzig die Technologie ist noch nicht ausgereift und serien-einsatztauglich.
- Wasserstoff hat allerdings nicht nur Befürworter: *„Befürworter einer Wasserstoffwirtschaft sprechen von nachhaltiger Energie, die aus vielen Quellen abgeleitet werden kann. Diese Versprechungen sind kaum haltbar. Wasserstoff ist lediglich ein Energieträger, dessen Herstellung, Verteilung und Nutzung enorm viel Energie verschlingt. Selbst mit effizienten Brennstoffzellen kann man nur ein Viertel des ursprünglichen Energieinputs zurückgewinnen. Langfristig wird man Wasserstoff elektrolytisch mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugen. Da sich Strom über Leitungen sehr effizient verteilen lässt, kann Wasserstoff den Wettstreit mit seiner Ursprungsenergie nie gewinnen. Aus physikalischen Gründen hat eine Wasserstoffwirtschaft keine Chance. Man sollte sich auf eine "Elektrowirtschaft" einstellen.“*<sup>254</sup>

---

<sup>254</sup> Vgl. Bossel, U. (2006). Wasserstoff löst keine Energieprobleme. Erschienen in: TECHNOLOGIEFOLGEN-ABSCHÄTZUNG – Theorie und Praxis, Nr.:1, 15. Jahrgang – April 2006

## 5.6 Brennstoffzelle

Alle bis jetzt vorgestellten Alternativen haben sowohl Vor- als auch Nachteile. Alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor belasten die Umwelt während des Betriebes, Elektroautos haben nur geringe Reichweiten und der Aufladevorgang dauert mehrere Stunden. Als weiterer alternativer Antrieb wird hier nun die Brennstoffzelle vorgestellt.

Erstmals 1839 arbeitete der Engländer Sir William Robert Grove an einer Brennstoffzelle die in der folgenden Grafik schematisch abgebildet ist.

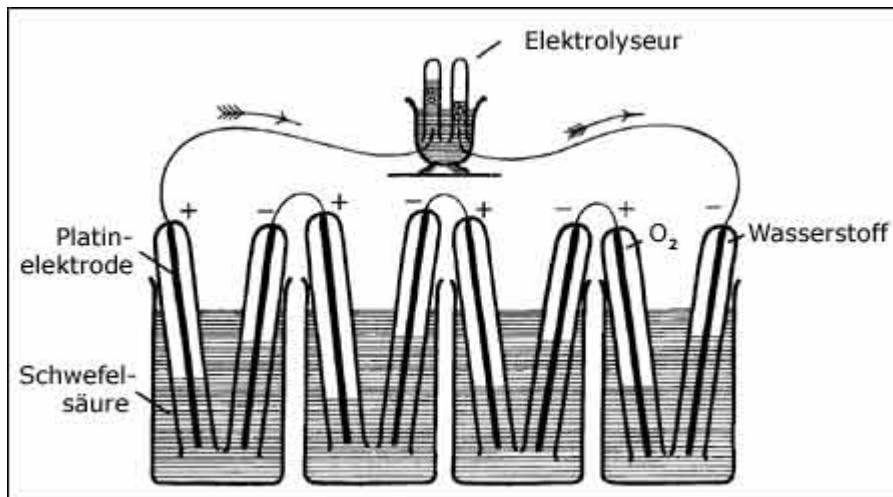


Abb. 48: Brennstoffzelle von Grove<sup>255</sup>

Diese erste Brennstoffzelle bestand aus zwei Platinelektroden, die in Schwefelsäure getaucht wurden. Um diese wurden Wasserstoff und Sauerstoff gespült. Da aber die messbare Spannung und der Stromfluss der Brennstoffzelle zu gering waren, konnte sich die Brennstoffzelle nicht gegen Erfindungen wie den Elektrodynamo oder den Verbrennungsmotor durchsetzen.

1959 baute Allis Chalmer das erste Landfahrzeug mit Brennstoffzelle, einen Traktor mit 15 kW Leistung. Brennstoffzellen werden auch auf dem Space Shuttle genützt. 1997 entstand die erste Kooperation auf dem Automobilsektor zum Thema Brennstoffzelle. Beteiligt waren Mercedes Benz, Ford und Ballard Power Systems. Mittlerweile betreibt beinahe jeder namhafte Autohersteller eigene Forschungen zum Thema Brennstoffzelle. Als Treibstoff bietet sich vor allem Wasserstoff an, aber auch andere Kohlenstoffverbindungen wie zum Beispiel Erdgas, Propan und Biogas lassen sich verwenden. Einzige Bedingung ist, dass der Wasserstoffanteil möglichst hoch ist.

### 5.6.1 Funktionsweise der Brennstoffzelle

<sup>255</sup> Vgl. <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/index.shtml> (abgerufen am 21.06.2010)

Die Elektrolyse wurde in dieser Arbeit bereits bei der Gewinnung von Wasserstoff erklärt. In der Brennstoffzelle passiert genau das Gegenteil. Bei der Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff entsteht elektrischer Strom und Wasser. Genau dieser Vorgang wird in der Brennstoffzelle durchgeführt. Wasserstoff ( $H_2$ ) ist von aus bestrebt, zusammen mit Sauerstoff ( $O_2$ ) zu Wasser ( $H_2O$ ) zu reagieren. Dazu bedarf es keiner externen Energiezufuhr, stattdessen wird sogar Energie abgegeben.

Die Brennstoffzelle besteht aus einer positiv geladenen Elektrode (Kathode) und einer negativ geladenen Elektrode (Anode), die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Als Elektrolyt werden verschiedenste Materialealien verwendet, unter anderem Kunststofffolien und Keramiken. Der Elektrolyt hat unter anderem die Aufgabe zu verhindern, dass die beiden Gase in direkten Kontakt kommen. Wäre dies der Fall, würden sie auf Grund des Katalysators unter Abgabe von Wärmeenergie miteinander reagieren. Die folgende Abbildung zeigt das Schema einer Strom liefernden Polymermembran- oder Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEM). Die Polymerfolie verhindert den Transport von Elektronen zwischen Kathode und Anode sowie den Transport von zu großen Wasserstoffmolekülen. Wasserstoff-Ionen können passieren. An der Anode wird der Wasserstoff mithilfe eines Platin-Katalysators in Elektronen und Wasserstoff-Ionen gespalten. Die Elektronen fließen durch einen äußeren Stromkreis, wo sie eine elektrische Vorrichtung, etwa einen Motor, antreiben, zur Kathode. In dieser Hinsicht verhält sich die Brennstoffzelle wie eine Batterie, die ständig wieder aufgeladen wird.<sup>256, 257, 258, 259</sup>

---

<sup>256</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 17ff

<sup>257</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG 35ff

<sup>258</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 141ff

<sup>259</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:89ff

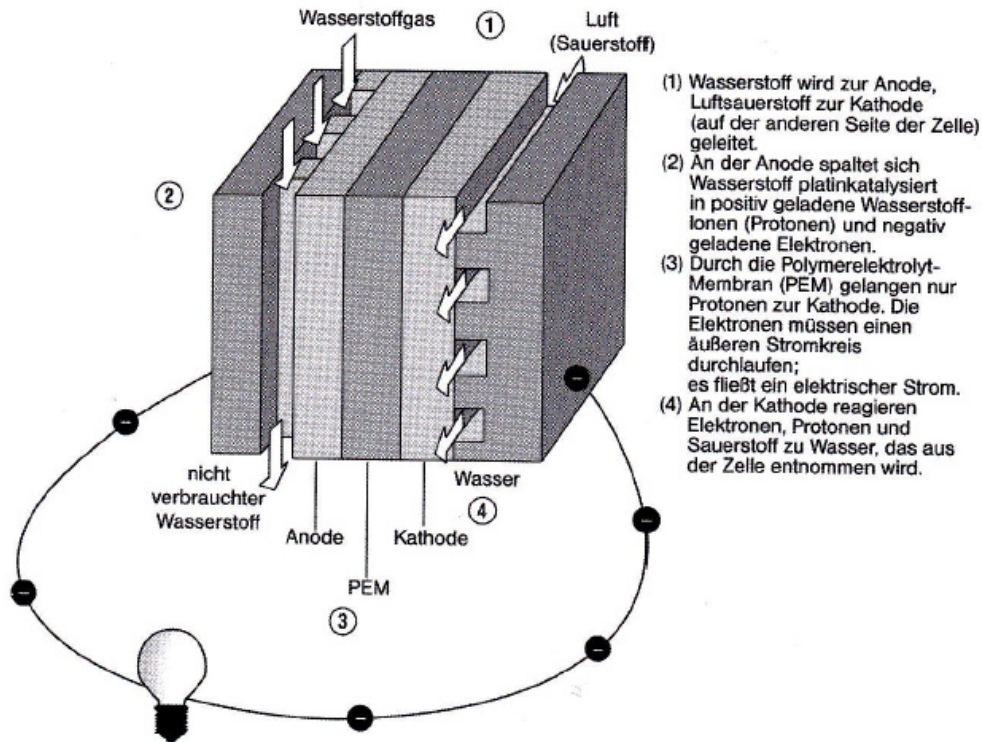


Abb. 49: Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle<sup>260</sup>

## 5.6.2 Typen von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen können nach verschiedenen Arten kategorisiert werden. Meist wird nach der Art des Elektrolyts unterschieden. Aber auch eine Einteilung nach der Arbeitstemperatur (Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur) oder in direkte und indirekte Brennstoffzellen ist sinnvoll. Bei ersteren wird der Brennstoff direkt zur Anode geleitet, bei der indirekten Methode muss er zuerst in einem externen Reaktor (Reformer) aufbereitet werden. Um die einzelnen Ausgestaltungsformen besser zu verstehen ist jeder Form eine beschriftete Funktionsskizze beigelegt.

### 5.6.2.1 Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

Die AFC (Alkaline Fuel Cell) ist die erste vollständig entwickelte Brennstoffzelle. Sie gehört zur Gruppe der Niedertemperatur-Zellen, ihre Betriebstemperatur beträgt zwischen 60 und 120° Celsius. Die AFC arbeitet mit einem relativ hohen Wirkungsgrad von bis zu 60% und wird bei Leistungen zwischen etwa 10 kW und 100 kW eingesetzt.

<sup>260</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 18



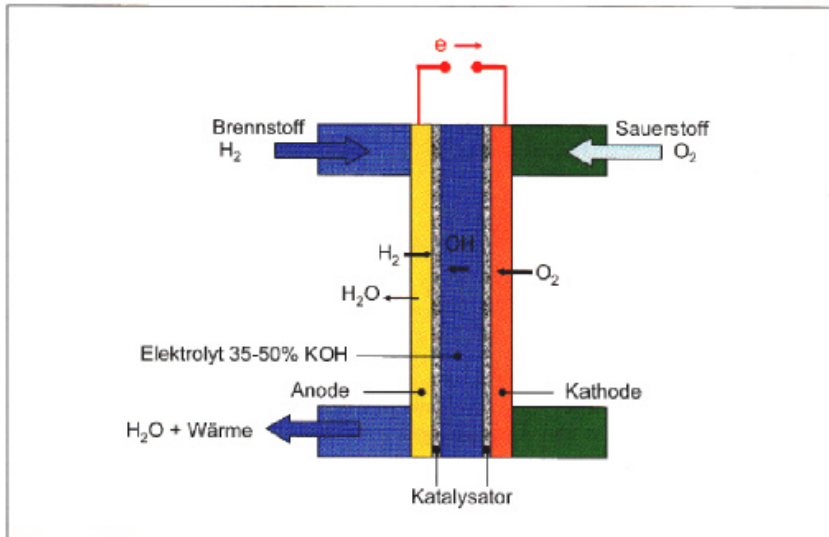


Abb. 50: Prinzip AFC<sup>261</sup>

Als Elektrolyt wird in der AFC flüssige Kalilauge verwendet. Als Brennstoff wird reiner Wasserstoff eingesetzt, als Reduktionsmittel kann nur reiner Sauerstoff verwendet werden, da das in der Luft enthaltene CO<sub>2</sub> die Elektroden verstopft. Das Wasser fällt im Elektrolyt an, es muss in einem eigenen Kreislaufprozess entnommen und entsorgt werden.

Vorteile:

- Der am besten untersuchte und am häufigsten eingesetzte Brennstoffzellen-Typ
- Sehr hoher Zellenwirkungsgrad
- Hohe Strapazierfähigkeit

Nachteile:

- Hohe Empfindlichkeit gegenüber CO<sub>2</sub>
- Hoher Aufwand für die Entnahme des Wassers aus dem Elektrolyt
- Kalilauge ist hochätzend und hochgiftig
- Hohe Betriebskosten durch Verwendung von reinem Sauerstoff und Wasserstoff<sup>262, 263, 264</sup>

### 5.6.2.2 Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM)

Die PEM-Brennstoffzellen gehören ebenfalls zu den Niedertemperaturbrennstoffzellen. Diese Zelle arbeitet je nach Typ in einem Temperaturbereich von 60°C bis 200°C. Es gibt

<sup>261</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 152

<sup>262</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 19ff

<sup>263</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 152ff

<sup>264</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG 41ff

drei verschiedene Arten von PEM-Zellen, allen gemein ist, dass sie ein nicht korrosives Polymer als Elektrolyt benutzen.

Als eine Sonderform der PEM gilt die **Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)**. Bei der Methanol als Treibstoff zugeführt wird.

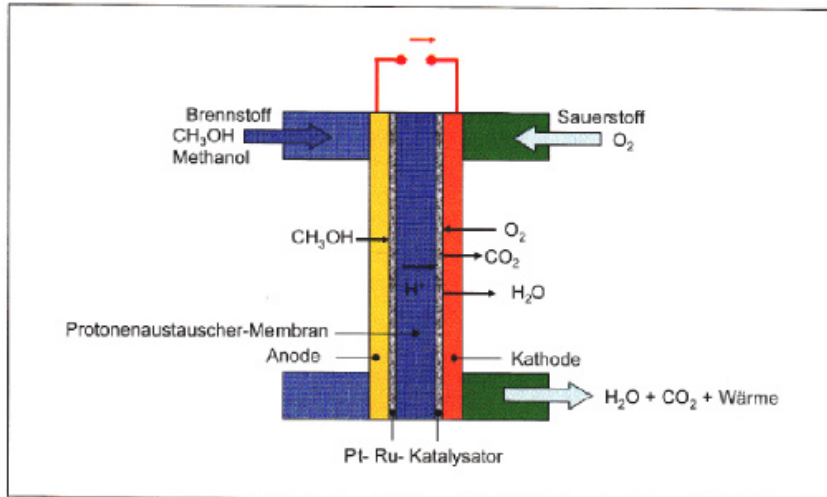


Abb. 51: Prinzip DMFC

Vorteile:

- direkte Umwandlung von Methanol in einer einfachen Systemtechnik
- die einfache Bauweise
- Verwendung in Kleingeräten
- Gute Lebensdauer
- Einfache Betankung

Nachteile:

- Methanol diffundiert von der Anodenseite zur Kathodenseite durch den Elektrolyt und schmälert so die Leistung
- DMFC werden zumeist bei Kleinanlagen bis zu 5 kW eingesetzt
- Relativ geringer Wirkungsgrad
- Als Abgas entsteht  $\text{CO}_2$ <sup>265, 266</sup>,

Eine weitere Ausformungsmöglichkeit einer PEM-Brennstoffzelle ist die **Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle (NT-PEMFC)**. Als Reduktionsmittel das an der Anode zugeführt wird dient Wasserstoff, als Oxidationsmittel an der Kathodenseite dient Luftsauerstoff. Als Abgas wird an der Kathodenseite Wasser und Wärme ausgeschieden. Die NT-PEMFC wird bei Leistungen von bis zu 500 kW eingesetzt.

<sup>265</sup> Vgl. Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 152ff

<sup>266</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG 42ff

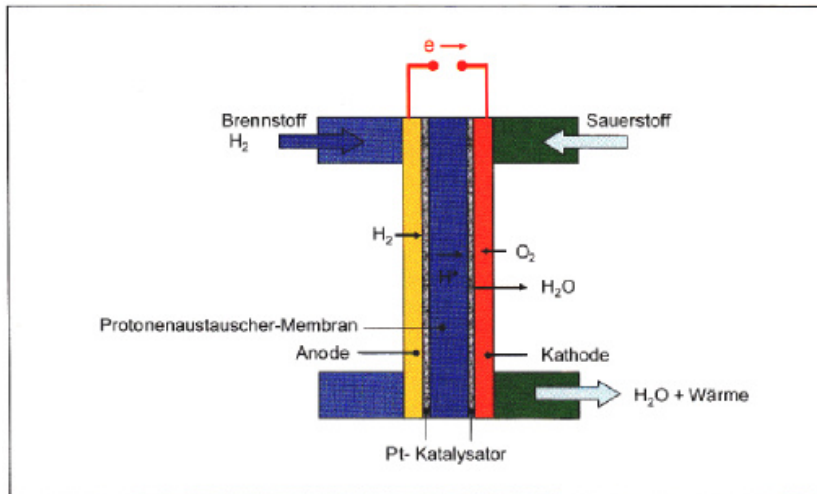


Abb. 52: Prinzip NT-PEMFC<sup>267</sup>

Vorteile:

- Erreicht hohe Stromdichte
- Weist gutes dynamisches Verhalten auf

Nachteile:

- Ist sehr empfindlich gegenüber Kohlenmonoxid
- Beschlagung mit Schwefel und Ammoniak mindern die Katalysatoraktivität
- Benötigt aufwendiges Wassermanagement

Von der NT-PEMFC unterscheidet sich nur geringfügig die HT-PEMFC. Die **Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle** unterscheidet sich nur durch eine neuartige Membran die verfahrenstechnische und elektrochemische Vorteile verspricht. Diese neu entwickelte Polybenzimidazol-Membran benötigt kein Wasser um leitfähig zu sein, die Leitfähigkeit wird dadurch gewährleistet, dass die Membran in Phosphorsäure getränkt wird. Dadurch entfällt das komplexe Wassermanagement.

Vorteile:

- Durch höhere Betriebstemperatur wird der Wirkungsgrad gesteigert (Abwärme kann weiterverwendet werden)
- Höhere CO<sub>2</sub>-Toleranz
- Gewichts- und Kostenvorteile im Vergleich zu NT-PEM-FC

Nachteile:

- Erhöhte Kosten für temperaturbeständige Systemkomponenten
- Erhöhte Kosten für säurebeständige Systemkomponenten
- Wasserkondensation muss vermieden werden<sup>268, 269</sup>

<sup>267</sup> Vgl. Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 155

### 5.6.2.3 Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)

Die PAFC zählt zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen und ist vorrangig für stationäre Anwendungen, etwa Kleinkraftwerke, geeignet. Sie ist weit verbreitet, dies liegt vor allem daran, dass sie einen weiten Leistungsbereich von 50 kW bis zu 11 MW abdeckt. Als Elektrolyt wird bei der PAFC konzentrierte Phosphorsäure verwendet. Als Brennstoff fungiert Wasserstoff, als Oxidationsmittel fungiert Sauerstoff.

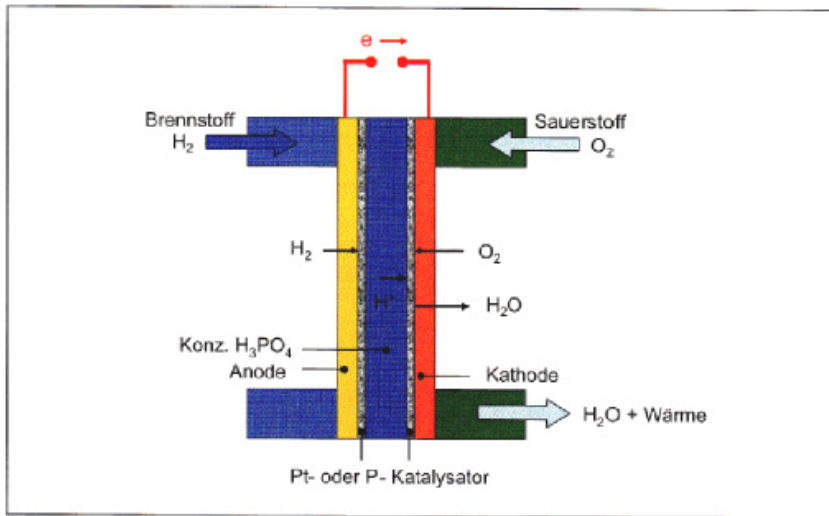


Abb. 53: Prinzip PAFC<sup>270</sup>

Vorteile:

- Hoher technischer Reifegrad
- Erhöhte Verträglichkeit gegenüber CO<sub>2</sub>, Schwefel und CO
- Höhere Betriebstemperatur erlaubt höhere Gesamtwirkungsgrade
- Kann mit reformiertem Erdgas und Luft betrieben werden

Nachteile:

- Verursacht hohe Kosten
- Kostensenkungspotenzial ist weitestgehend erschöpft
- Aufwendiges Wassermanagement
- Begrenzte Lebensdauer wegen hochätzender Phosphorsäure
- Geringe Leistungsdichte<sup>271, 272</sup>,

<sup>268</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 156ff

<sup>269</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:109ff

<sup>270</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 157

### 5.6.2.4 Carbonat-Schmelze-Brennstoffzellen (MCFC)

Die MCFC ist eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle, ihre Betriebstemperatur liegt circa bei 650°C. Bei dieser Temperatur zerbrechen die organischen Kohlenwasserstoffverbindungen der Energieträger und teilen sich in Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Als Energieträger kann Erd-, Kohle-, Bio- und Deponiegas verwendet werden. Bei der MCFC besteht der Elektrolyt aus chemisch aggressivem Kalium- und Lithiumkarbonat. Der Aufheizvorgang nimmt sehr viel Zeit in Anspruch, weshalb auch diese Zelle nicht für den Einsatz in Personenkraftwagen geeignet ist.

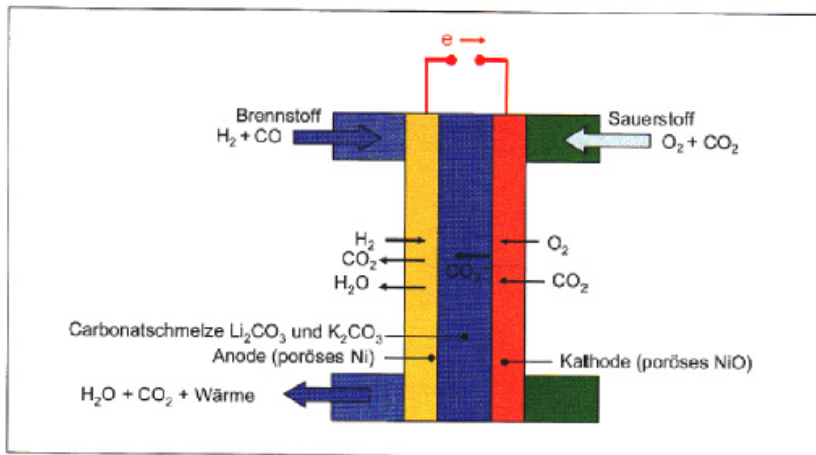


Abb. 54: Prinzip MCFC<sup>273</sup>

Vorteile:

- Hoher Gesamtwirkungsgrad
- Relativ geringe Herstellungskosten
- Unempfindlich gegenüber CO und CO<sub>2</sub>

Nachteile:

- Die interne Reformierung birgt sicherheitstechnische Probleme
- Hoher Platzbedarf
- Als Emission tritt CO<sub>2</sub> aus
- Geringe Lebensdauer

### 5.6.2.5 Oxid-Keramik-Brennstoffzelle (SOFC)

<sup>271</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 157ff

<sup>272</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG 44

<sup>273</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 158

Die SOFC zählt mit einer Betriebstemperatur von 750°C bis zu 1.100 °C ebenfalls zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Der Elektrolyt besteht aus einem unveränderlich festen, keramischen Werkstoff. Da hohe Betriebstemperaturen vorliegen kann auf einen externen Reformer verzichtet werden, zum Start der Brennstoffzelle ist jedoch eine externe Heizung notwendig. Die SOFC befindet sich noch im Forschungsstadium.

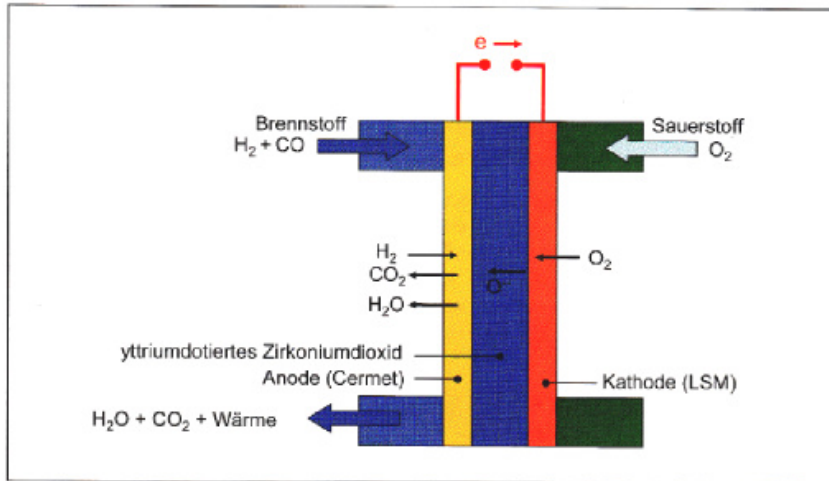


Abb. 55: Prinzip SOFC<sup>274</sup>

### Vorteile:

- Weiter Anwendungsbereich
- Einfache und robuste Bauweise
- Erfordert kein Flüssigkeitsmanagement
- Lange Lebensdauer
- Erlaubt interne Reformierung
- Durch Nutzung der Abwärme sind hohe Wirkungsgrade möglich

### Nachteile:

- Hohe Betriebstemperaturen bedürfen erhöhter Sicherheitsmaßnahmen
- Zelle emittiert  $CO_2$ <sup>275, 276, 277</sup>

<sup>274</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 160

<sup>275</sup> Vgl. Eichseder, H. (2008). Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner. S.: 159ff

<sup>276</sup> Vgl. Geitmann, S. (2003). Wasserstoff & Brennstoffzellen. Konstanz: Christiani Verlag. S.: FG 45ff

<sup>277</sup> Vgl. Romm, J. (2006). Der Wasserstoff-Boom. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S.: 21ff

### 5.6.3 Treibstoffe für Brennstoffzellen

Als Treibstoff für Brennstoffzellen sind viele Energieträger möglich, solange der Wasserstoff-Anteil möglichst hoch ist. Alle wurden bereits hier in dieser Arbeit ausführlich dargestellt, weswegen hier nur noch eine kurze Zusammenfassung folgt.

Der wichtigste Treibstoff ist reiner Wasserstoff, entweder in flüssiger oder in komprimierter Form. Dieser reine Wasserstoff wird von den Brennstoffzellen-Typen A-FC, PEM-FC und PA-FC benötigt. Diese Typen von Zellen reagieren sehr schnell mit Leistungsminderung auf Verunreinigungen im Wasserstoff. Je reiner dieser ist, desto besser.

Die MC-FC benötigt zum Betrieb Erdgas, Kohlendioxid, Biogas oder Deponiegas. Die MC-FC ist eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle und kann deshalb auf externe Reformer verzichten und spaltet das Gas selbst zu Wasserstoff und Nebenprodukten auf. Dieser Typ von Brennstoffzelle emittiert CO<sub>2</sub>.

Auch die SO-FC, eine weitere Hochtemperatur-Brennstoffzelle, wird zumeist mit Propan betrieben. Auch sie verzichtet auf einen externen Reformer. Auch diese Brennstoffzelle emittiert im Betrieb CO<sub>2</sub>.<sup>278</sup>

### 5.6.4 Bewertung des Systems

#### 5.6.4.1 SWOT-Analyse der Brennstoffzelle

Strengths
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die meisten Brennstoffzellen sind extrem schadstoffarm oder gar schadstoffneutral, und somit sehr umweltschonend</li><li>• Die Brennstoffzelle verfügt über keine bewegten Teile, Abnutzungserscheinungen sind viel geringer</li><li>• Die Brennstoffzelle ist generell wartungsarm und verlangt nicht nach hohen Reparaturkosten, wie zum Beispiel Batterien bei Elektroautos</li><li>• Der Betrieb ist vibrationsfrei und geräuscharm</li><li>• Die Brennstoffzelle verfügt über eine kontinuierliche Leistungsabgabe</li><li>• Die Verwendung von Wasserstoff ist nachhaltig</li><li>• Brennstoffzellen sind modular aufgebaut, können also leicht ausgewechselt und repariert werden</li><li>• Hoher thermodynamischer Wirkungsgrad</li></ul>

<sup>278</sup> Vgl. Gerl, B. (2002) Innovative Automobilantriebe. Landsberg: verlag moderne industrie. S.:156ff

<b>Weaknesses</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Die Technik ist bei PKWs für die Großserienproduktion noch nicht komplett ausgereift</li><li>• Hohe Material- und Fertigungskosten</li><li>• Hohe Empfindlichkeit gegenüber Unreinheiten</li><li>• Hoher Regelungsaufwand</li><li>• Die Herstellung, der Transport und die Lagerung von Wasserstoff sind energie- und kostenintensiv</li><li>• Die Verwendung von Koble- und Erdgas ist nicht nachhaltig</li><li>• Eine verwendbare Wasserstoff-Infrastruktur existiert zurzeit nicht</li><li>• Platzverbrauch im Personenkraftwagen durch die Tanks</li><li>• Die Brennstoffzelle erzeugt wenig Abwärme, die für die Heizung an Bord verwendet werden könnte</li></ul>
<b>Opportunities</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Großes Entwicklungspotenzial</li><li>• Verringerung der Herstellungskosten bei Großserienproduktion</li><li>• Kostengünstigere Herstellung von Wasserstoff senkt die Betriebskosten</li><li>• Steigende Attraktivität von alternativen Antrieben bei steigenden Ölpreisen</li><li>• Der Sandwich-Boden mit Brennstoffzelle und Tanks unter den Sitzen erhöht das Platzangebot für die Passagiere</li></ul>
<b>Threats</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Der technologische Fortschritt kommt ins Stocken und die Brennstoffzellen bleiben, bezogen auf den Verkehrs-Markt, im Experimentierstadium</li><li>• Die Hersteller erhöhen ihre Anstrengungen beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor</li><li>• Die Angst bei Kunden vor Wasserstoff kann nicht abgebaut werden</li><li>• Die Preise für Wasserstoff sinken nicht wie erwartet, die Betriebskosten bleiben auf dem Niveau von heute</li></ul>

#### 5.6.4.2 Versorgungsinfrastruktur

Auch die Brennstoffzelle wird sich nur durchsetzen können wenn eine vernünftige und kostengünstige Versorgungsinfrastruktur errichtet wird. Die benötigte Versorgungsinfrastruktur für Wasserstoff wurde bereits im Kapitel „Wasserstoff-Verbrennungsmotor“ dargestellt.

Die benötigte Versorgungsinfrastruktur für Gase, die als Treibstoff für Brennstoffzellen dienen können, und Methanol wurde bereits im Kapitel „Alternative Kraftstoffe“ dargestellt.



#### 5.6.4.3 Verfügbarkeit der Ressourcen

Auch bei den Personenkraftwagen die mit Brennstoffzellen ausgerüstet sind spielt die Verfügbarkeit eine große Rolle um als nachhaltiges Konzept eine langfristige Alternative zu den herkömmlichen Verbrennungsmotoren darstellen zu können.

Die meisten Brennstoffzellen werden mit Wasserstoff betrieben, die Verfügbarkeit von Wasserstoff wurde bereits ausführlich beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor dargestellt.

Auch die Verfügbarkeit anderer Treibstoffe für Brennstoffzellen wie Erdgas, Biogas und auch Methanol als flüssiger Brennstoff spielen bei der Nachhaltigkeit dieses Konzepts eine wichtige Rolle. Deren Verfügbarkeit wurde bereits im Kapitel 5.3 dargestellt.

#### 5.6.4.4 Betriebskosten und Praxisbeispiele

Neben diversen anderen Faktoren spielen natürlich auch die anfallenden Betriebskosten eine wichtige Rolle bei der Kaufentscheidung von Kunden. Die Betriebskosten sollen so gering wie möglich sein. Brennstoffzellen-Autos sind zurzeit nur als Prototypen oder in Kleinserien erhältlich. Die Betriebskosten für einen längeren Zeitraum können derweil nur geschätzt werden. Als Beispiel für die Betriebskosten dienen hier der Mercedes Benz B-Klasse F-Cell aus dem Jahr 2009 und der Opel Hydrogen 4. Die Serienproduktion von beiden Fahrzeugen soll 2015 anlaufen. Bis dorthin sollen in Kooperation mit diversen Energieunternehmen und dem Staat in Deutschland zahlreiche Wasserstoff-Tankstellen errichtet werden.



Abb. 56: Mercedes Benz B-Klasse F-CELL<sup>279</sup>

<sup>279</sup> Vgl. <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/mercedes-benz-b-klasse-f-cell-geht-in-kleinserie-1484203.html> (abgerufen am 06.07.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Der Mercedes Benz wurde in Kleinserie an 200 Kunden weltweit verteilt, der Opel an 10 Unternehmen in Berlin. Noch ist die Fertigung zu teuer, um einen realistischen Preis zu kalkulieren.



Abb. 57: Opel Hydrogen 4<sup>280</sup>

Deshalb sind sowohl der Opel Hydrogen 4 als auch der Mercedes Benz B-Klasse F-Cell nur im Leasing samt Wartungs- und Reparaturvertrag zu haben.

Modell	Mercedes Benz F-Cell	Opel Hydrogen 4
Produktionsmenge	200 Fahrzeuge	10 Fahrzeuge
Kofferraumvolumen	416 Liter	-
Antrieb	Brennstoffzelle	Brennstoffzelle
Leistung	100kW/136PS	74kW/100PS
Gewicht	> 1.700kg	2.010kg
Druck im H2-Tank	700 bar	700 bar
Fassungsvermögen	3,8 kg H2	4 kg H2
Reichweite	385 km	320 km
Verbrauch in Diesel	3,3 Liter/100 km	-
Batterietyp	Lithium-Ionen	Lithium-Ionen
Kaufpreis	-	-
Kilo-Preis H2 in €	€ 8,00	€ 8,00
Preis "Volltanken"	€ 30,40	€ 32,00
Preis für 100 km	€ 7,90	€ 10,00

Tabelle 28: Vergleich Opel und Mercedes Benz<sup>281,282</sup>

Die Betriebskosten auf 100 Kilometern entsprechen zurzeit in etwa jenen von Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotoren. Die Preise für Wasserstoff werden aber nach Mei-

<sup>280</sup> Vgl. <http://www.automobilesreview.com/uploads/2009/05/opel-hydrogen4-in-berlin.jpg> (abgerufen am 06.07.2010)

<sup>281</sup> Vgl. <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/mercedes-benz-b-klasse-f-cell-geht-in-kleinserie-1484203.html> (abgerufen am 06.07.2010)

<sup>282</sup> Vgl. [http://www.autobild.de/artikel/opel-hydrogen4-fuer-auto-bild\\_812213.html](http://www.autobild.de/artikel/opel-hydrogen4-fuer-auto-bild_812213.html) (abgerufen am 06.07.2010)

nung zahlreicher Experten in Zukunft sinken, wenn die Produktion von nachhaltigem Wasserstoff aus Solar- und Windkraft technologisch voranschreitet.<sup>283, 284</sup>

### 5.6.5 Zusammenfassung Brennstoffzelle

- Personenkraftwagen mit Brennstoffzellen-Antrieb werden als Prototypen bereits seit Jahren hergestellt und auf Autosalons präsentiert. Waren die ersten Fahrzeuge reine Konzeptstudien so schreitet die Technologie immer weiter voran. Die Anforderungen der Kunden in puncto Reichweite, Tankdauer, Platzangebot und Leistung nähern sich immer weiter jenen von herkömmlichen PKWs an.
- Die Technologie der Brennstoffzelle ist ausgereift, es gibt verschiedenen Typen mit verschiedenen Stärken und Schwächen. Auch hier werden die Schwächen, etwa die schlechte Kaltstart-Fähigkeit, kontinuierlich verbessert.
- Der Wasserstoff wird zurzeit am günstigsten aus Erdgas gewonnen. Dieses Konzept ist allerdings nicht nachhaltig, da Erdgas ein fossiler Energieträger ist. Der Preis für einen Kilogramm Wasserstoff beträgt zurzeit etwa 8€. Dieser Preis wird allerdings bei vermehrtem Einsatz regenerativer Energien bei der Herstellung sinken. Man rechnet in Zukunft mit einem Preis von circa 3,5€ je Kilogramm Wasserstoff.
- Wie schon beim Wasserstoffverbrennungsmotor beschrieben liegt die zentrale Schwäche des Konzepts in der Herstellung, der Speicherung und im Transport des Wasserstoffs. Diese Vorgänge sind sehr energie- und somit auch kostenintensiv.
- Eine weitere entscheidende Schwäche ist die beinahe nicht vorhandene Versorgungsinfrastruktur. Im gesamten deutschsprachigen Raum gibt es kaum mehr als ein paar Dutzend Tankstellen. Viel zu wenig um die Versorgung flächendeckend garantieren zu können. Durch Gemeinschaftsinitiativen soll bis 2015 das Tankstellennetz ausgebaut werden.
- Da bis heute alle Fahrzeuge im den Status eines Prototyps nicht überschritten und auch die Fahrzeuge aus Kleinserien nicht regulär verkauft wurden ist bis heute kein Verkaufspreis für Brennstoffzellen-Fahrzeuge bekannt.

---

<sup>283</sup> <http://ww2.autoscout24.de/bericht/brennstoffzellen-auto-kommt/wasserstoff-marsch/4319/139472/> (abgerufen am 06.07.2010)

<sup>284</sup> Vgl. <http://www.all-electronics.de/news/33964-H2+Mobility:+Initiative+zum+Aufbau+einer+Wasserstoffinfrastruktur+in+Deutschland?PHPSESSID=a23adff693a8faf9fe08bab537612ce6> (abgerufen am 06.07.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

- Der entscheidende Vorteil der Wasserstoff-Technologie ist die praktisch endlose Verfügbarkeit des Rohstoffs. Beim Verbrauch im Auto entstehen keine Abgase, nur Wasserdampf, der, theoretisch, wieder als Brennstoff verwendet werden kann.
- Die Entscheidung, ob sich die Technologie durchsetzt oder nicht, wird davon abhängen ob eine flächendeckende Infrastruktur in absehbarer Zeit errichtet werden kann und ob die Preise für Wasserstoff wie erwartet sinken werden.




## 6 Vergleich der alternativen Antriebsformen

Die in Kapitel 5 vorgestellten alternativen Antriebsformen und alternativen Kraftstoffe werden in diesem Kapitel noch einmal zusammengefasst und übersichtlich anhand von einheitlichen Kriterien bewertet. Anhand folgender Kriterien werden die einzelnen Alternativen miteinander verglichen:

- Stand der Technik (derzeitige Entwicklung, Perspektiven)
- Versorgungsinfrastruktur (Tankstellen, Reparaturmöglichkeiten)
- Emissionen (durch den Betrieb verursacht)
- Ansprüche der Käufer (in puncto Reichweite, Handlichkeit,..)
- Alltagstauglichkeit (Tankvorgang, Handling, Einsatzmöglichkeiten)
- Verwendungszweck (Stadtauto, Überlandfahrten, spezieller Platzbedarf)
- Vergleich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren
- Nachhaltigkeit (der verwendeten Rohstoffe, der Entsorgung, wie lange dieses Konzept verwendet werden kann)
- Kosten (Kauf, Wartung, Betrieb)

### 6.1 Vergleichsmatrix der alternativen Antriebe

In der folgenden Matrix werden die alternativen Antriebe untereinander verglichen. Die Bewertung erfolgt in 4 Kategorien:

	Die Technologie genügt den gestellten Ansprüchen nicht, sie weist kein Potenzial auf, sie ist nicht nachhaltig und bedeutet keine Weiterentwicklung gegenüber Benzin und Diesel.
	Die Technologie weist nur geringes Potential auf und entspricht den gestellten Ansprüchen nur in geringem Maße. Eine gravierende Weiterentwicklung zu Benzin und Diesel ist nicht zu erkennen.
	Die Technologie genügt den an sie gestellten Ansprüchen und weist genügend Potenzial für die Zukunft auf.
	Diese Technologie weist sehr großes Zukunftspotenzial auf und übertrifft die an sie gestellten Ansprüche. Die Technologie ist nachhaltig und in jeder Hinsicht besser als Benzin und Diesel.

Technologie	Kriterien		
	Stand der Technik	Versorgungsinfrastruktur	Nachhaltigkeit
<b>Hybrid-Technologie</b>	<p>Die Hybridtechnologie ist seit Jahren erfolgreich auf dem Markt. Die Technologie ist ausgereift. Es kann unterschieden werden zwischen Voll-Hybrid und Mild-Hybrid. Durch den Einbau von mehreren Aggregaten verkompliziert sich die verbaute Technik, es gibt mehr fehleranfällige Teile.</p> <p>★ ★</p>	<p>Die Versorgungsinfrastruktur muss für einen Markt mit Benzin- und Diesel-Hybride nicht verändert werden. Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge sind erst langfristig eine Option. Das bestehende Tankstellennetz wird durch den geringeren Verbrauch zusammenschrumpfen.</p> <p>★ ★</p>	<p>Die Hybridtechnologie baut weiterhin auf den Einsatz von fossilen Brennstoffen. Hybridfahrzeuge die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden sind auf dem Markt noch nicht erhältlich und werden erst mittel bis langfristig eine Alternative darstellen.</p>
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	<p>Alternative Kraftstoffe werden bereits seit Jahren eingesetzt, der Umbau bestehender Motorsysteme ist technisch ausgereift. Ab Werk werden allerdings nur wenige Modelle angeboten.</p> <p>★ ★</p>	<p>Einzelne Kraftstoffe wie Biodiesel und Erdgas sind heute bereits bei vielen Tankstellen erhältlich, andere Kraftstoffe noch nicht. Die bestehende Versorgungsinfrastruktur kann allerdings leicht adaptiert werden.</p> <p>★ ★</p>	<p>Es muss bei den alternativen Kraftstoffen unterschieden werden inzwischen nachhaltigen und nicht-nachhaltigen Treibstoffen. LPG und CNG sind nur begrenzt auf der Erde vorhanden, während Biodiesel und Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen wird. Man muss bei der Erzeugung vor allem in Entwicklungsländern auf die Lebensgrundlagen der Bevölkerung achten.</p> <p>★ ★</p>
<b>Batterieelektrische Antriebe</b>	<p>Reine batterieelektrische Antriebe sind zum heutigen Zeitpunkt noch nicht für die Großserienproduktion geeignet. Vor allem die Größe und die Leistungsfähigkeit der Batterien sind heute noch eingeschränkt. Durch technische Entwicklungen sind allerdings hier noch gravierende Verbesserungen zu erwarten.</p> <p>★ ★</p>	<p>Batterieelektrische Antriebe sind darauf ausgelegt die Akkus zu Hause über Nacht aufzuladen. Eine Akkuladung reicht im Normalfall leicht für den nächsten Tag. Bei weiteren Strecken müssen Schnellladestationen aufgesucht werden, die allerdings bis jetzt noch nicht errichtet sind. Deren Errichtung ist allerdings technisch unkompliziert und kostengünstig möglich. Die Leistungskapazität des dafür benötigten Stromversorgungsnetzes ist derzeit noch nicht bekannt. Die Dauer und Kosten für einen Batterietausch sind noch nicht absehbar.</p> <p>★</p>	<p>Die Nachhaltigkeit dieses Konzeptes hängt sehr stark davon ab wie der Strom erzeugt wird. Bei vermehrter Gewinnung aus erneuerbaren Ressourcen ist ein sehr hoher Grad an Nachhaltigkeit erreichbar. Die verwendeten Materialien bei den Akkumulatoren sind allerdings nicht erneuerbar, wie zum Beispiel Lithium. Auch die Entsorgung der verwendeten Schwermetalle ist biologisch gesehen ein Problem. Bei verbesserter Technik können allerdings auch diese Probleme gelöst werden.</p> <p>★ ★</p>

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Technologie	Kriterien		
	Stand der Technik	Versorgungsinfrastruktur	Nachhaltigkeit
<b>Solarantrieb</b>	<p>Reine Solarautos befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Hybride Modelle sollen noch 2010 auf den Markt kommen. Die Solarzellentechnologie weist aber großes Potenzial auf.</p> <p></p>	<p>Für reine Solarautos ist keine Versorgungsinfrastruktur zum Betanken notwendig.</p> <p></p>	<p>Silizium ist in großen Mengen auf der Erde vorhanden. Die Energie der Sonne steht noch „unendlich“ lange zur Verfügung.</p> <p></p>
<b>Wasserstoff Verbrennungsmotor</b>	<p>Die Technik für den Wasserstoff-Verbrennungsmotor wird nahtlos, bis auf einige Adaptionen, von benzinbetriebenen Motoren übernommen. Die Speicherung an Bord ist aus technischer Sicht ebenfalls ausgereift.</p> <p></p>	<p>Wasserstofftankstellen sind derzeit nur sehr wenige vorhanden. Ihre Errichtung und der Betrieb sind kostenintensiv. Auch der Transport von den Erzeugungsanlagen zu den Tankstellen ist kosten- und energieintensiv. Die Erzeugung von Wasserstoff in Kleinanlagen in den Tankstellen selbst ist erst mittel- bis langfristig möglich.</p> <p></p>	<p>Die Nachhaltigkeit des Wasserstoff-Konzeptes hängt rein vom für die Erzeugung verwendeten Strom ab. Wasserstoff an sich ist auf der Erde nahezu in unendlichem Ausmaß vorhanden. Allein die Erzeugung erzeugt Emissionen, diese können allerdings durch die Verwendung von erneuerbaren Energien verringert werden.</p> <p></p>
<b>Brennstoffzelle</b>	<p>Für den Einsatz in Personenkraftwagen sind jedoch noch technische Weiterentwicklungen im Bereich der Haltbarkeit notwendig, was jedoch kein Problem sein dürfte, da die technische Weiterentwicklung noch in vollem Gange ist. Die Verbreitung als Antriebsform wird jedoch weitgehend durch den für den Betrieb benötigten Wasserstoff verzögert.</p> <p></p>	<p>Wie bereits beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor, der dieselbe Infrastruktur benötigt wie die Brennstoffzelle, fehlt auch hier noch die gesamte Infrastruktur.</p> <p></p>	<p>Die Nachhaltigkeit des Wasserstoff-Konzeptes hängt auch bei der Brennstoffzelle rein vom für die Erzeugung verwendeten Strom ab. Wasserstoff an sich ist auf der Erde nahezu in unendlichem Ausmaß vorhanden. Allein die Erzeugung erzeugt Emissionen, diese können allerdings durch die Verwendung von erneuerbaren Energien verringert werden.</p> <p></p>
<b>Ein-Liter-Auto</b>	<p>Die verwendete Motorentechnik, die Hybrid-Technologie, ist technisch ausgereift, bei den Werkstoffen für Karosserie werden ständig Verbesserungen entwickelt, die jedoch nur mehr kleine Einsparungen bringen werden.</p> <p></p>	<p>Die Versorgungsinfrastruktur kann nahtlos übernommen werden. Bei vermehrtem Einsatz von Niedrigenergieautos wird sich das Tankstellennetz, bedingt durch die geringere Nachfrage an Treibstoffen, allerdings verkleinern.</p> <p></p>	<p>Das Konzept von Niedrigenergieautos basiert, zumindest heute, auf einer Kombination von Diesel- und Hybridtechnologie. Es werden also weiterhin fossile Brennstoffe verwendet.</p>

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Technologie	Kriterien		
	Emissionen	Ansprüche der Käufer	Alltagstauglichkeit
<b>Hybrid-Technologie</b>	<p>Bedingt durch den geringeren Verbrauch von Hybridfahrzeugen sinkt die Zahl der Emissionen beim Betrieb. Ein emissionsloser Betrieb wie er bei Brennstoffzellen-PKW's möglich ist, ist bei Hybridfahrzeugen allerdings ausgeschlossen.</p> <p style="text-align: center;">★</p>	<p>Hybridfahrzeuge werden den Ansprüchen der Kunden in puncto Fahrverhalten, Platzangebot, Tankmöglichkeiten, Einfachheit des Tankvorganges und Verbrauch gerecht. Reparaturen können in jeder Werkstatt durchgeführt werden. Auch das Betreiben des PKW's selbst unterscheidet sich nicht. Lange Vorwärmzeiten wie bei Elektro- und Brennstoffzellenautos existieren nicht. Allerdings ist der Anschaffungspreis noch höher als bei vergleichbaren konventionellen PKW's.</p> <p style="text-align: center;">★★</p>	<p>Das Hybrid-Konzept ist sehr alltagstauglich. Es kann zu jeder Jahres- und Tageszeit eingesetzt werden, es fallen keine langen Vorwärmzeiten an. Die große Reichweite und der leise Betrieb machen Überlandfahrten sogar leichter und verträglicher als mit herkömmlichen PKW's.</p> <p style="text-align: center;">★★</p>
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	<p>Bei den Emissionen werden gegenüber dem Betrieb mit Benzin und Diesel leichte Verbesserungen erzielt. Allerdings fallen im Vergleich mit anderen alternativen Antriebsformen hier die meisten Emissionen beim Betrieb an.</p> <p style="text-align: center;">★</p>	<p>Die Ansprüche der Käufer in puncto Reichweite werden zumeist erfüllt, auch das Platzangebot bleibt zumeist unverändert. Tankmöglichkeiten können leicht umgebaut werden, auch die Kosten für die Umrüstung sind nicht allzu hoch und amortisieren sich zumeist nach einigen Jahren. Reparaturen können überall durchgeführt werden.</p> <p style="text-align: center;">★★</p>	<p>Einige alternative Kraftstoffe benötigen bei niedrigen Temperaturen eine lange Vorwärmphase oder sind bei Kälte überhaupt nicht einsetzbar. Erdgas-betriebene PKW's werden von manchen Kunden auf Grund ihrer subjektiv eingeschätzten Gefährlichkeit abgelehnt, das Parken mit Flüssiggas betriebenen PKW's ist nicht überall gestattet.</p> <p style="text-align: center;">★</p>
<b>Batterieelektrische Antriebe</b>	<p>Die Emissionen bei der Herstellung des Stroms variieren sehr stark, sinken allerdings mit dem vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien. Der Betrieb an sich läuft emissionslos ab.</p> <p style="text-align: center;">★★</p>	<p>Die Batterie nimmt viel Platz im Innenraum ein und ist sehr schwer. Geringere Energiedichte bedeuten Einbußen bei Beschleunigung und Geschwindigkeit. Auch die Reichweite ist in den meisten Fällen nicht mit Verbrennungsmotoren zu vergleichen. Öffentliche Schnellladestationen sind noch nicht vorhanden.</p> <p style="text-align: center;">★</p>	<p>Hochtemperaturakkus brauchen eine Vorwärmzeit von ein paar Minuten um auf Betriebstemperatur zu kommen. Bei extremer Kälte reagieren einige Batterietypen empfindlich.</p> <p style="text-align: center;">★</p>



## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Technologie	Kriterien		
	Emissionen	Ansprüche der Käufer	Alltagstauglichkeit
<b>Solarantrieb</b>	Das reine Solarauto stößt beim Verbrauch keine Emissionen aus. 	Die Ansprüche der Kunden werden zurzeit nicht erfüllt. Reine Solarmobile sind in ihrer optischen Gestaltung wenig flexibel, da sehr große Solarpanels an der Außenhaut benötigt werden. 	Da Solarmobile auf die Sonne angewiesen sind und die Batterien an Bord klein dimensioniert sind ist die Alltagstauglichkeit stark eingeschränkt. 
<b>Wasserstoff Verbrennungsmotor</b>	Wie bereits bei den batterieelektrischen Antrieben hängt die Menge der Emissionen stark von dem verwendeten Strom ab. Auch hier läuft der Betrieb emissionslos ab. 	Die Ansprüche der Kunden in puncto Reichweite werden beim Wasserstoffverbrennungsmotor auf Grund der geringen Leistungsdichte und der Größe der Tanks noch nicht erreicht. Tankmöglichkeiten gibt es nur in sehr geringem Ausmaß, auch der Tankvorgang wird von vielen Kunden als zu gefährlich und zu umständlich abgelehnt. Das Platzangebot wird durch den Tank im Kofferraum zumeist eingeschränkt. 	Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist, wie der normale Verbrennungsmotor, immer einsetzbar. Das Parken ist allerdings nicht überall gestattet. 
<b>Brennstoffzelle</b>	Wie bereits bei den batterieelektrischen Antrieben hängt die Menge der Emissionen stark von dem verwendeten Strom ab. Auch hier läuft der Betrieb emissionslos ab. 	Die Reichweite von heute erhältlichen Brennstoffzellen-Fahrzeugen liegt bei circa 400 Kilometern, ist also für die Kundenwünsche ausreichend. Der Betankungsvorgang ist für die Kunden ungewohnt, auch gibt es starke Bedenken gegenüber Wasserstoff als Treibstoff. Der Wasserstofftank benötigt viel Platz. 	Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist, wie der normale Verbrennungsmotor, immer einsetzbar. Das Parken ist allerdings nicht überall gestattet. 
<b>Ein-Liter-Auto</b>	Wie bereits bei der Hybrid-Technologie sinkt zwar die Zahl der Emissionen, diese können allerdings nicht komplett verhindert werden. 	Die Ansprüche der Käufer in puncto Reichweite werden erfüllt, allerdings bieten echte Ein-Liter-Autos bis jetzt nur Platz für 2 Passagiere, auch Stauraum ist nur sehr wenig vorhanden. Der Tankvorgang bleibt der gleiche wie heute, auch Reparaturen können überall durchgeführt werden.	Wie bereits das Hybrid-Konzept kann auch das Ein-Liter Auto zu jeder Zeit betrieben werden. 

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Technologie	Kriterien		
	Verwendungszweck	Vergleich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren	Kosten
<b>Hybrid-Technologie</b>	<p>Das Hybrid Auto kann für ein Vielzahl von Anwendungen problemlos verwendet werden. Durch die hohe Reichweite ist ein Einsatz als Firmenauto mit hohen jährlichen Kilometerzahlen optimal. Lediglich der Stauraum kann durch die zusätzlich verbauten Aggregate wie Elektromotor und Batterie etwas leiden.</p> <p>★ ★</p>	<p>Im Vergleich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren schneidet der Hybrid PKW wegen seines geringeren Verbrauchs und seinen geringeren Emissionen sehr gut ab. Einzig der kompliziertere technische Aufbau des Hybrid PKW spricht für die herkömmlichen Wagen mit Verbrennungsmotor.</p> <p>★ ★</p>	<p>Die Kosten für einen Hybrid PKW sind, noch, höher als für einen herkömmlichen Wagen mit Otto- oder Dieselmotor, die Amortisationsdauer ist noch unrealistisch lang. Dies kann sich jedoch bei fortschreitender Großserienproduktion noch ändern.</p> <p>★</p>
<b>Alternative Kraftstoffe</b>	<p>Mit alternativen Kraftstoffen betriebene Personenkraftwagen eignen sich für eine Vielzahl von Anwendungen, als Firmenauto, als Familienauto oder als Zweitauto.</p> <p>★ ★</p>	<p>Alternative Kraftstoffe sind oftmals billiger als Benzin oder Diesel. Die Betriebskosten sind dadurch ebenfalls zumeist niedriger, der Umbau amortisiert sich in der Regel nach einigen Jahren. Auch werden bei alternativen Kraftstoffen Emissionen beim Betrieb eingespart. Für herkömmliche Kraftstoffe spricht die höhere Leistungsdichte der Treibstoffe.</p> <p>★ ★ ★</p>	<p>Modelle ab Werk die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden bilden die Ausnahme. Zumeist wird privat umgerüstet. Die Kosten für den Umbau amortisieren sich nach einigen Jahren. Die alternativen Kraftstoffe sind geringer besteuert, allerdings sind die Betriebskosten immer noch höher als bei einem modernen Hybridantrieb.</p>
<b>Batterieelektrische Antriebe</b>	<p>Bis jetzt wurden batterieelektrisch betriebene PKWs zumeist als kleine Stadtautos konzipiert. Der Sportwagen Tesla Roadster bildet hier eine Ausnahme. In Zukunft wird die gesamte Palette an PKWs als Elektroautos erhältlich sein. Einzig die geringere Reichweite schließt Einsatzgebiete mit hohen Kilometerleistungen, etwa bei Überlandfahrten, aus.</p> <p>★ ★</p>	<p>Die Vorteile der Verbrennungsmotoren liegen bei den hohen Reichweiten und bei der höheren Leistungsdichte. Der Betrieb von Elektroautos ist allerdings emissionslos, auch der Strom kann ohne nennenswerte Emissionen hergestellt werden.</p> <p>★ ★</p>	<p>Noch sind reine Elektroautos in der Anschaffung teurer im Vergleich zu herkömmlichen Wagen. Die Betriebskosten sind allerdings viel niedriger, auch die Anschaffungskosten werden bei Großserienproduktion sinken. Viele Kunden lassen sich von der geringen Reichweite und der fehlenden Versorgungsinfrastruktur abschrecken.</p> <p>★ ★</p>

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Technologie	Kriterien		
	Verwendungszweck	Vergleich mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren	Kosten
<b>Solarantrieb</b>	<p>Hybride Solarautos sind als Stadtautos konzipiert. Ihre kleine Dimensionierung schließt Familienautos aus. Die geringe Reichweite spricht gegen eine Verwendung als Firmenwagen.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Vorteile sind die Nachhaltigkeit und die nicht vorhandenen Emissionen beim Betrieb. Der Betrieb ist leiser. Geringe Reichweiten und Leistungseinbußen sprechen für Benzin und Diesel.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Noch sind keine Verkaufspreise für reine Solarmobile bekannt. Die äußerst geringen Betriebskosten würden auch einen höheren Verkaufspreis rechtfertigen.</p> <p style="text-align: center;"></p>
<b>Wasserstoff Verbrennungsmotor</b>	<p>Auf Grund der geringen Energiedichte des Wasserstoffs sind hohe Reichweiten zurzeit noch nicht möglich, in bivalentem Antrieb jedoch sind über 1.000 Kilometer mit einer Tankfüllung möglich. Bedingt durch den Tank ist wenig Stauraum vorhanden. Der leisere Betrieb und die nicht vorhandenen Emissionen mit Wasserstoff sind optimal für die Stadt geeignet.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Die Vorteile von Benzin und Diesel liegen in der hohen Energiedichte und der damit einhergehenden höheren Reichweite. Der Betrieb mit Wasserstoff ist hingegen emissionsärmer und leiser.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Wasserstoff ist in puncto Betriebskosten zurzeit noch etwas teurer. Es wird beim Wasserstoff allerdings mit einer erheblichen Preisreduktion gerechnet. Sobald Wasserstoff gewinnbringend auch in Kleinanlagen produziert werden kann fallen auch große Teile der Transportkosten weg.</p> <p style="text-align: center;"></p>
<b>Brennstoffzelle</b>	<p>Die Brennstoffzelle ist sehr variabel einsetzbar, als Firmenauto, als Zweitauto und als Stadtauto. Einzig das Ladevolumen des Kofferraums ist auf Grund des verbauten Wasserstofftanks geringer.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Die Vorteile der Brennstoffzelle liegen in ihrer geringen Wartungsbedürftigkeit und in ihrem leisen Betrieb. Die Energiedichte von Wasserstoff ist viel geringer als bei Benzin und Diesel, allerdings verursacht die Brennstoffzelle keine Emissionen beim Betrieb.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Wasserstoff ist in puncto Betriebskosten zurzeit noch etwas teurer. Es wird beim Wasserstoff allerdings mit einer erheblichen Preisreduktion gerechnet. Sobald Wasserstoff gewinnbringend auch in Kleinanlagen produziert werden kann fallen auch große Teile der Transportkosten weg. </p>
<b>Ein-Liter-Auto</b>	<p>Auf Grund seiner geringen Ausmaße und seiner schwachen Motorisierung eignet es sich nicht als Familien- oder Firmenauto. Einzig in der Stadt, wo der Kraftstoffverbrauch am höchsten ist, kann sich das Ein-Liter-Auto für Singles etablieren.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Das Ein-Liter-Auto hat in puncto Verbrauch, Emissionen und Betriebskosten gegenüber herkömmlichen Wagen klare Vorteile. Allerdings sprechen die hohen Anschaffungskosten und die sehr geringe Alltagstauglichkeit klar gegen das Konzept.</p> <p style="text-align: center;"></p>	<p>Das echte Ein-Liter-Auto befindet sich noch im Stadium eines Prototypen, Zukünftige Verkaufspreise kann man derzeit nur erahnen. Die Anschaffungskosten werden erst mittel- bis langfristig bei Großserienproduktion deutlich sinken.</p>

## 6.2 Well-to-Wheel-Analyse alternativer Antriebe

Für die alternativen Antriebe ist es nicht nur wichtig, technisch ausgereift zu sein, sondern auch der Wirkungsgrad muss im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben effizient sein. Diese Wirkungsgrade werden mit der sogenannten „Well to Wheel – Analyse“ durchgeführt. Der Begriff „Well to Wheel“ beschreibt die systematische Erfassung aller Effekte der Kraftstoffbereitstellung vom Bohrloch, zur Verarbeitung in Raffinerien oder bei der Elektrolyse bis zur Bewegung der Reifen. In dieser Untersuchung wird ausschließlich der Kraftstoff untersucht, ausgeklammert werden die Herstellung des Fahrzeugs und die Verwertung am Ende des Lebenszyklus.

Für die Well to Wheel – Analyse ist es wichtig Fahrzeuge für die Vergleiche zur Verfügung zu haben die untereinander vergleichbar sind. Die Well to Wheel – Analyse in dieser Arbeit wird mittels der Onlinedatenbank „OPTIRESOURCE“<sup>285</sup> durchgeführt. Diese Datenbank ermöglicht es, verschiedenste sinnvolle Kombinationen von Energiequellen, Kraftstoffen und Fahrzeugantrieben projiziert auf das Jahr 2010 zu entwerfen und zu vergleichen. Neben der Well to Wheel – Analyse wird gleichzeitig eine Tank to Wheel Analyse durchgeführt. Diese zeigt die Emissionen und Energieverbräuche an Bord an.

Basierend auf Studien zur ganzheitlichen Energiebilanzierung von der Energiequelle bis zum angetriebenen Rad<sup>286</sup> lassen sich der zu erwartende Kraftstoffverbrauch und die dazugehörigen Treibhausgasemissionen ermitteln. Das Berechnungsergebnis wird als Vergleich eines aktuellen Benzinfahrzeuges der Kompaktklasse mit der durchgeführten Kraftstoff-, Prozess- und Antriebsauswahl präsentiert. Mittels der ausgewählten Kombinationen lassen sich die Auswirkungen auf den äquivalenten Kraftstoffverbrauch sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufzeigen.

### **Benzinäquivalent**

Benzinäquivalent ist eine Maßeinheit für Energie. Sie wird verwendet, um den Energieverbrauch von alternativen Antriebsformen und Kraftstoffen die verschiedene Energieträger benutzen, leicht ersichtlich und einfach zu vergleichen.

Ein Benzinäquivalent von einem Liter entspricht dem Heizwert eines Liters Benzin und wird mit circa 32 MJ (Megajoule) angenommen. Der tatsächliche Energiegehalt von Benzin schwankt sortenabhängig um circa 4%.<sup>287</sup>

---

<sup>285</sup> Vgl. <http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html> (abgerufen am 27.07.2010)

<sup>286</sup> Wissenschaftliche Grundlage bildet die gemeinsam von CONCAWE, EUCAR und JRC durchgeführte Studie "Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, version 2a" vom Dezember 2005.

<sup>287</sup> [http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy\\_conv.html](http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy_conv.html) (abgerufen am 23.08.2010)

### CO<sub>2</sub>-Äquivalent

CO<sub>2</sub> ist das bekannteste klimabeeinflussende Gas (Treibhausgas). Daher wird auch oft das Gefährdungspotenzial von weniger bekannten Gasen in eine äquivalente CO<sub>2</sub>-Menge umgerechnet. Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent wird dabei als Gramm pro verbrauchte kWh beim Endverbraucher angegeben. Wer also beispielsweise eine kWh durch Heizöl erzeugt, produziert 310 g CO<sub>2</sub>. Mit Erdgas sind dies nur 242 Gramm. Mit Heizstrom (UCTE-Mix)<sup>288</sup> dagegen schon 918 Gramm, des Weiteren weist die Stromerzeugung mit durchschnittlich 30 – 40 % einen relativ geringen Gesamtwirkungsgrad auf. Am günstigsten liegt Brennholz mit 64 Gramm.<sup>289</sup>

Einige Werte sind bei der Tank to Wheel - Analyse höher als bei der Well to Wheel Analyse. Dies scheint auf den ersten Blick verwunderlich. Möglich ist dies, da es sich hier um Durchschnittswerte pro zurückgelegten Kilometer handelt. Ist die Herstellung und der Transport relativ emissionsfrei möglich so sinkt der Wert bei der Well to Wheel - Analyse, Ist der Wert bei der Tank to Wheel – Analyse relativ hoch, kann er hier nicht durch eine mögliche emissionsfreie Herstellung gemildert werden.

	Liter Benzinäquivalent pro 100 km (Well to Wheel)	Liter Benzinäquivalent pro 100 km (Tank to Wheel)	g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (Well to Wheel)	g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (Tank to Wheel)
Benzin (Ottomotor)	6,7	5,9	164	140
Diesel (Direkteinspritzung)	6,4	5,5	156	131
Hybrid (Diesel)	5,2	4,5	129	108
Biodiesel (Dieselmotor)	12,3	5,3	86	133
Erdgas (Ottomotor)	7,4	5,9	147	108
Äthanol (Ottomotor)	17,4	5,9	43	137
LPG (Ottomotor)	6,6	5,9	141	126
Biogas (Ottomotor)	11	5,9	32	108
Elektro (Lithium-Ionen) Strom aus EU-Mix-Strom	6	2,1	87	0
Elektro (Lithium-Ionen) Strom aus Sonnenenergie	2,1	2,1	0	0
Elektro (Lithium-Ionen) Strom aus Wasserkraft	2,2	2,1	0	0

<sup>288</sup> Der UCTE Mix (europäischer Strommix) bestand 2009 aus 11,59% Wasserkraft, 52,64% fossile Brennstoffe, 29,43% nukleare Energie, 6,34% erneuerbarer Energie. E-control, Stromkennzeichnungsbericht 2009, Seite 28

<sup>289</sup> Vgl. <http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/co2-aequivalent.htm> (abgerufen am 23.08.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Wasserstoff- Verbrennungsmotor	8,6	5,2	0,5	0,5
Brennstoffzelle (H <sub>2</sub> aus Wasserkraft erzeugt)	4,8	2,9	0	0
Brennstoffzelle (Methanol aus Erdgas)	8,5	4,6	170	109

Tabelle 29: Well-to-Wheel-Analyse

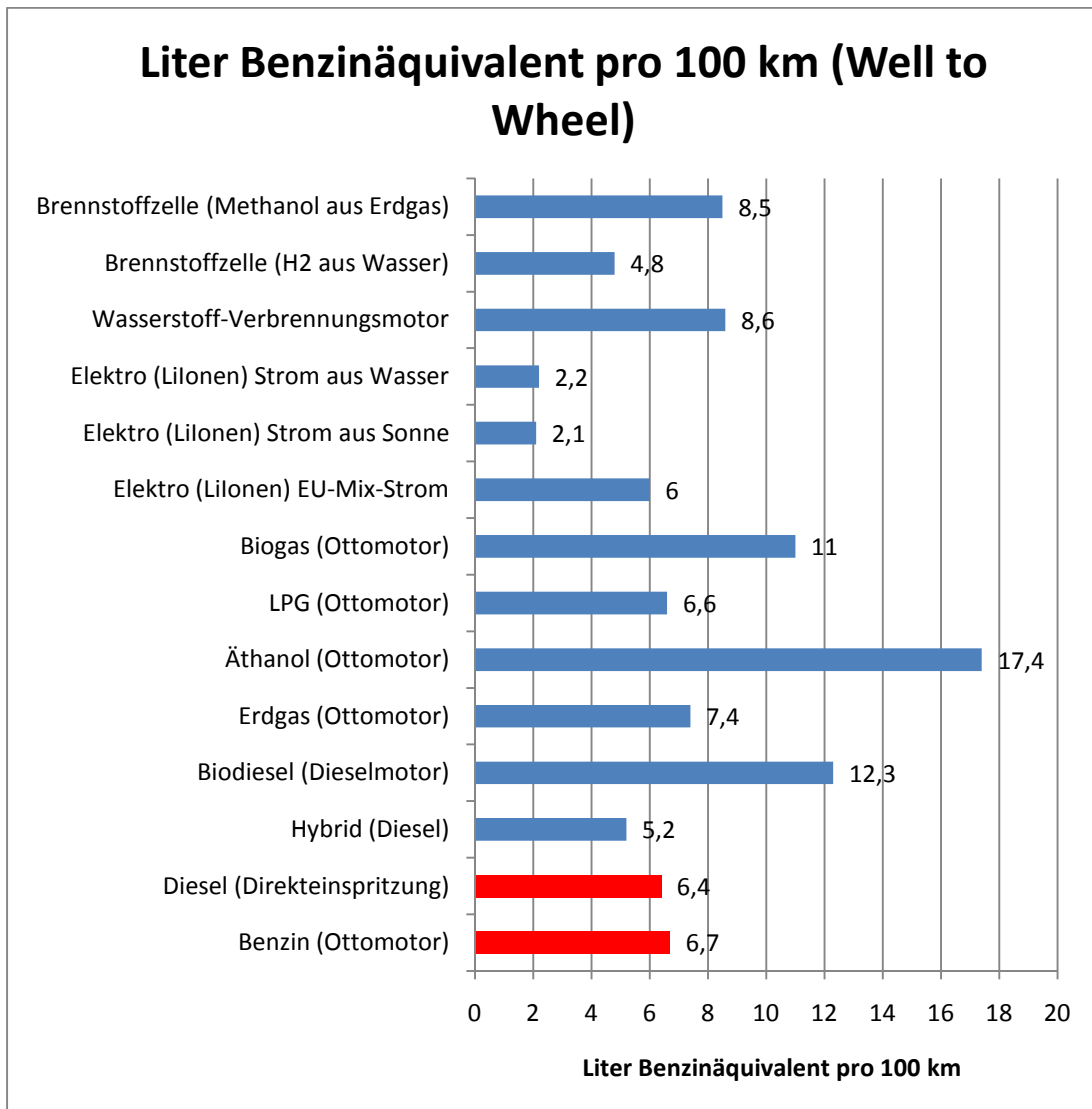


Abb. 58: Liter Benzinäquivalent pro 100 km (komplette Kette)

Beim Wasserstoff macht es einen großen Unterschied ob der Wasserstoff mittels aus Wasserkraft erzeugtem Strom oder aus elektrischem Strom aus dem UCTE –Mix hergestellt wird. Dies würde den Wert auf 13,5 Liter Benzinäquivalent pro 100 km hochschnellen lassen. Grund dafür ist die energietechnisch aufwendige Herstellung des Wasserstoffs.

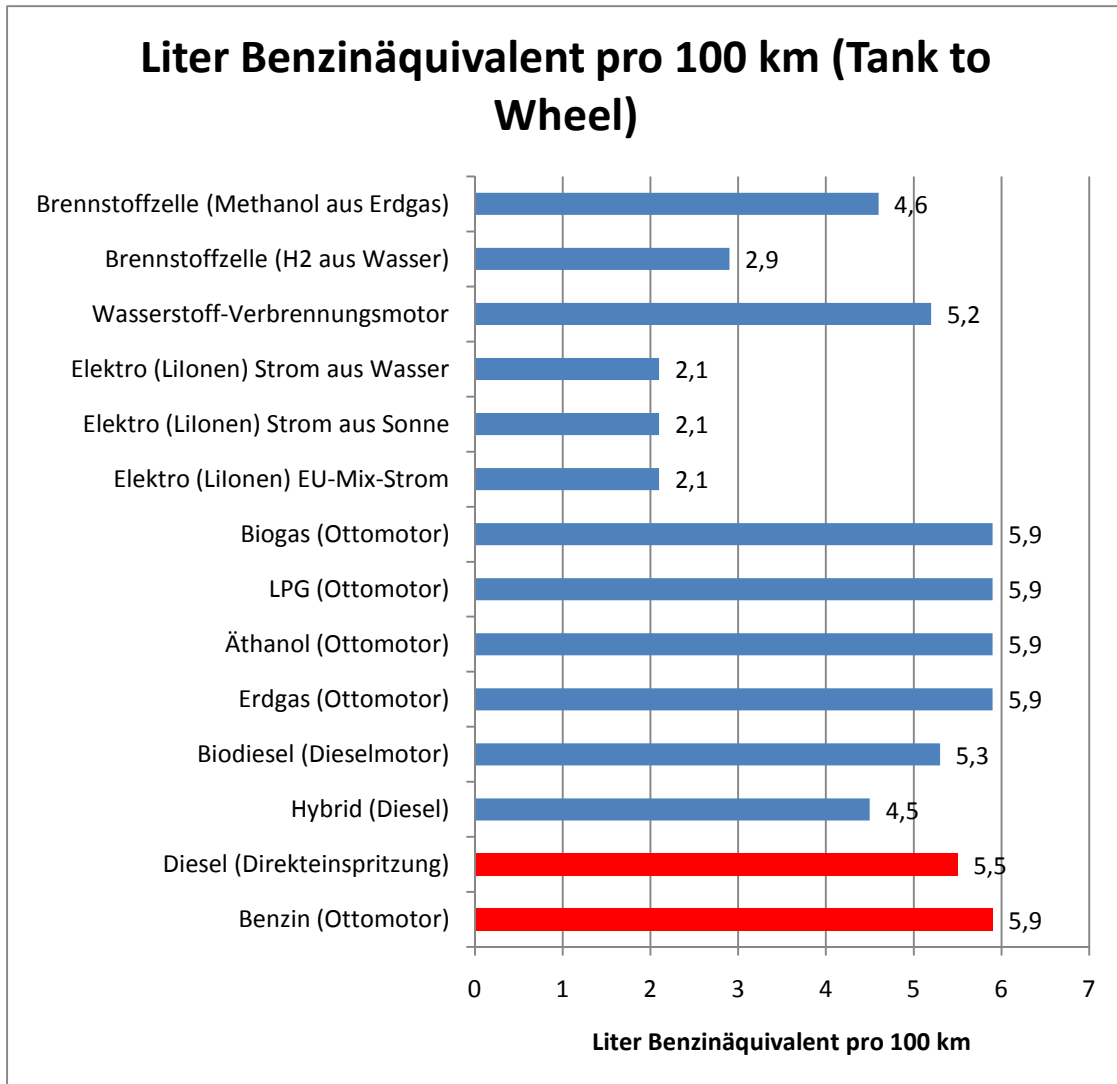


Abb. 59: Liter Benzinäquivalent pro 100 km (nur Fahrzeug)

Diese Grafik zeigt den geringen Verbrauch an Energie von batterieelektrischen Fahrzeugen sehr gut. An dieser Grafik ist auch sehr gut zu erkennen, dass sich langfristig die Wasserstoff-Brennstoffzelle gegenüber dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor durchsetzen wird, da sie einen viel geringeren Verbrauch und somit geringere Betriebskosten aufweist. Des Weiteren sieht man anhand der obigen Grafik sehr gut, dass die Verbräuche von gasförmigen Biokraftstoffen alle annähernd gleich sind. Dies resultiert aus der annähernd gleichen Energiedichte der Kraftstoffe.

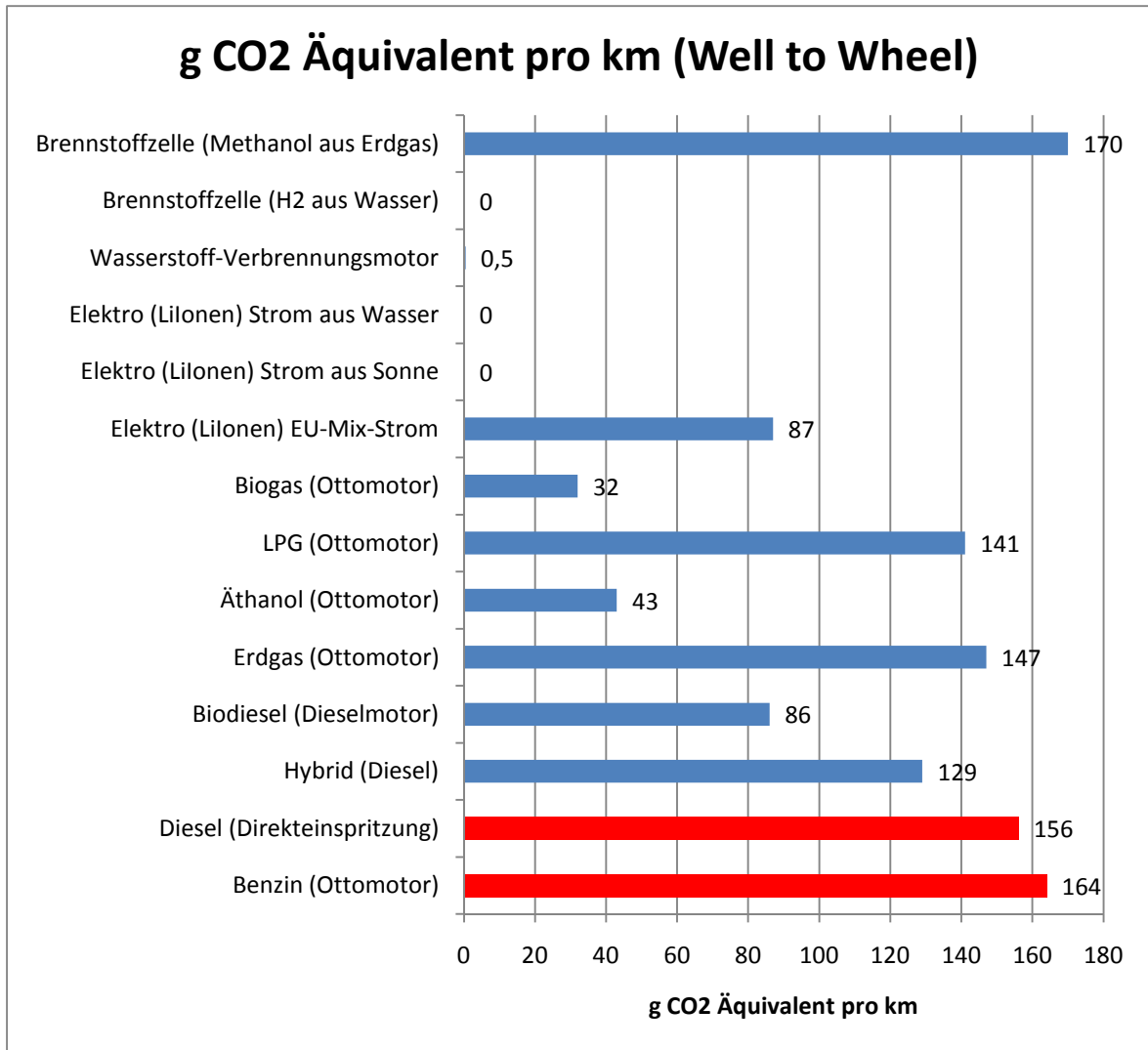


Abb. 60: g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km (komplette Kette)

Auch hier macht es einen großen Unterschied wie der Wasserstoff gewonnen wird. Bei der Herstellung mittels Strom aus Wasserkraft oder durch Solarstrom sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen gleich Null. Bei der Herstellung des Wasserstoffs aus elektrischem Strom (UCTE-Mix) fallen 196g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro 100 km an. Dies wäre der absolute Spitzenwert in dieser Tabelle. Grund hierfür ist, dass die Herstellung energieaufwendig ist und beim EU-Strommix auch Kohle- und Gaskraftwerke eingesetzt werden.

Auch bei den batterieelektrischen Antrieben spielt es eine wichtige Rolle woher der Strom kommt. Bei der Erzeugung durch Strom aus Wasserkraft oder Solarstrom fallen für die komplette Erzeugungskette keine nennenswerten Emissionen an, kommt der Strom aus dem EU-Strommix fallen mit 87 g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro 100 km relativ viele Emissionen an.

Die Grafik zeigt auch, dass eine neue Technologie wie die mit Methanol aus Erdgas befeuerte Brennstoffzelle ökologisch nicht sinnvoll sein kann. Deren Emissionen überragen sogar Benzin und Diesel.



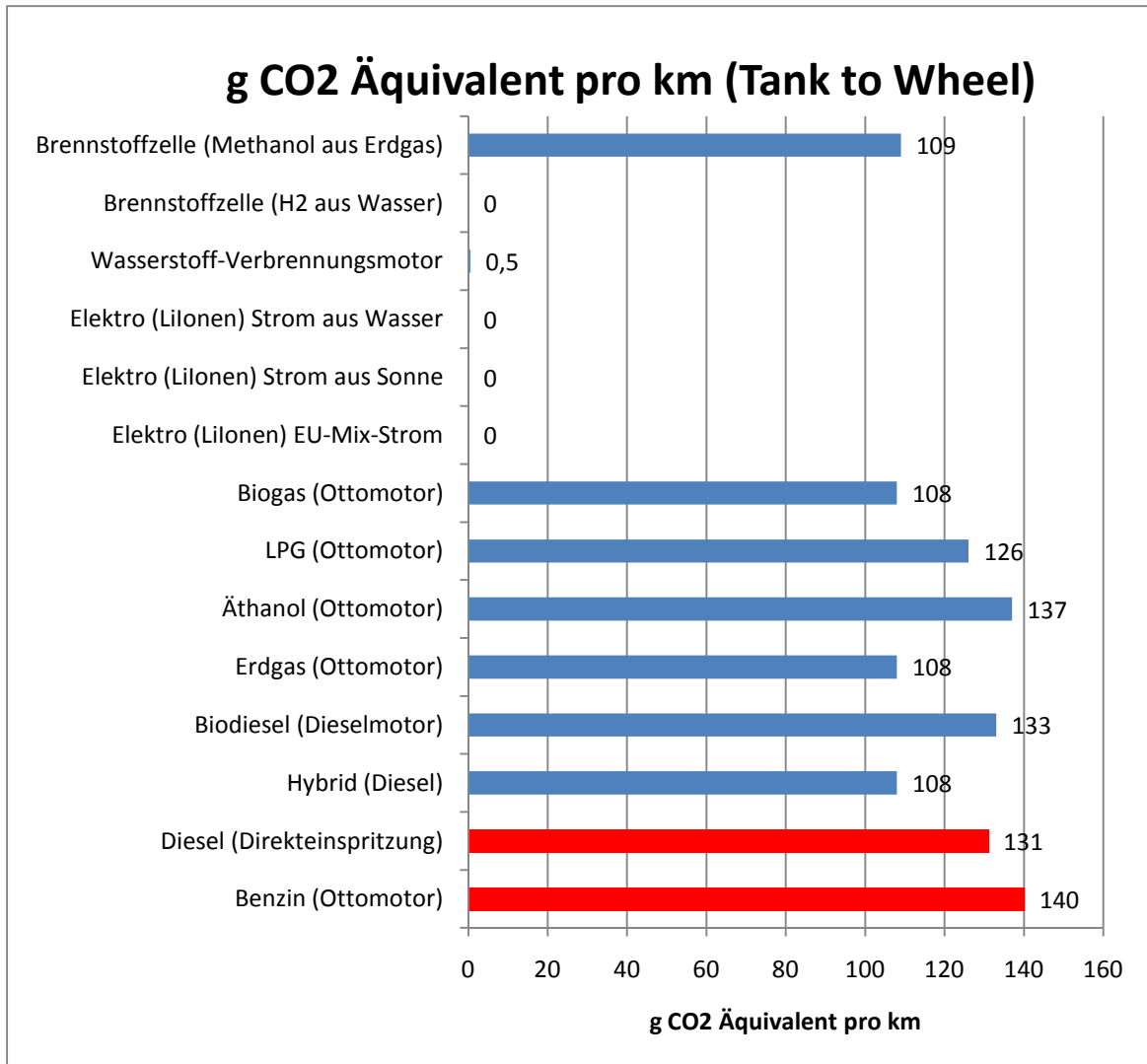


Abb. 61: g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km (nur Fahrzeug)

Diese Grafik zeigt eindeutig, dass Verbrennungsmotoren direkt im Fahrzeug die meisten Emissionen hervorbringen. Komplette emissionslos beim Fahren arbeiten der Elektromotor, die Brennstoffzelle, die mit Wasserstoff betrieben wird, und der Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Auch in dieser Grafik sieht man wieder, dass die mit Methanol befeuerte Brennstoffzelle keinen nennenswerten Fortschritt gegenüber Benzin und Diesel darstellt bzw. gegenüber bereits verbreiteten alternativen Kraftstoffen bzw. Antriebsformen (Biogas, Erdgas, Hybrid) keine Einsparung bringt.

## **7 Szenarien bis 2030**

In diesem Kapitel soll die Entwicklung der zuvor vorgestellten alternative Antriebsformen und Kraftstoffe auf dem österreichischen Automobilmarkt dargestellt werden. In den folgenden beiden Szenarien soll unter vereinfachten Annahmen und Daten der Statistik Austria dargestellt werden wie sich die Alternativen auf dem Markt entwickeln können.

### **7.1 Methodisches Vorgehen**

Bevor die beiden Szenarien präsentiert werden hier noch einige Hinweise und wichtige Bemerkungen in Hinblick auf das Zustandekommen der Szenarien. Bei den Berechnungen handelt es sich nicht um Prognosen sondern um Szenarien, die ein Ergebnis anhand der eingestellten Parameter liefern. Das Ergebnis der beiden Szenarien soll also vielmehr einen groben Überblick über die Marktchancen und die Entwicklungen auf dem Markt liefern.

Es werden 2 Szenarien präsentiert. Das erste Szenario „0-Fall“ sieht einen negativen Trend. Der Ölpreis steigt weiter an wie bisher, auch die Forschung und der Wille der Käufer ändern sich nicht im Vergleich zu Heute. Das „Maßnahmen-Szenario“ sieht einen stark steigenden Ölpreis und weitere Maßnahmen voraus. Die Forschung wird intensiviert. Auf Grund steigender Betriebskosten suchen die Käufer nach Alternativen.

#### **7.1.1 Zeitlicher und örtlicher Bezug**

Die Berechnungen in den folgenden beiden Szenarien sind auf den PKW-Markt in Österreich begrenzt. Betrachtet werden ausschließlich Alternativen die für den österreichischen Markt von Relevanz sind. Aus diesem Grund findet das Solarauto in diesen beiden Szenarien keinen Platz, da die geografischen und meteorologischen Voraussetzungen in Österreich für einen reinen Solarantrieb nicht gegeben sind. Der zeitliche Rahmen spannt sich von 2009, wo die letzten gültigen Daten in diesem Bereich erhoben wurden, bis zum Jahr 2030.

#### **7.1.2 Datengrundlagen**

Als Datengrundlagen dienen Erhebungen der Statistik Austria aus den Jahren 2004 bis 2009. Diese Daten sind online abrufbar unter:

[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge -  
bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (abgerufen am 26.07.2010)

### 7.1.3 Vereinfachte Annahmen

Für die Berechnung der beiden Szenarien wurden eine Vielzahl an vereinfachten Annahmen vom Autor getroffen:

- Die Marktdurchdringungsraten von alternativen Antrieben und Kraftstoffe werden im Jahr 2009 auf null gesetzt. Diese Näherung ist, wie die folgende Grafik zeigt, durchaus realistisch und berechtigt.

	<b>Bestand 2009</b>	<b>Anteil in %</b>
<b>Benzin</b>	1.972.906	45,2
<b>Diesel</b>	2.381.906	54,6
<b>Elektro</b>	223	0
<b>Sonstige (Flüssiggas, Erdgas, bi- valenter Betrieb und kombinierter Betrieb (Hybrid)</b>	5.463	0,1

Tabelle 30: Marktdurchdringungsraten 2009<sup>290</sup>

- Für den Gesamtbestand an PKWs in Österreich wird der Trend der vergangenen Jahre weitergeführt. Es wird angenommen, dass die Österreicher nicht auf individuelle Mobilität verzichten. In den letzten Jahren stieg die Zahl der PKW durchschnittlich um 1,25% pro Jahr. Dieser Trend wird in beiden Szenarien fortgeführt.
- Die Beimischung von Biokraftstoffen zu den konventionellen Kraftstoffen wie sie heute bereits üblich ist wird ausgeklammert.
- Der Zeitpunkt des Markteintrittes einer Alternative und deren Marktdurchdringung werden vom Autor anhand von den in den jeweiligen Kapiteln unter „Bewertung des Systems“ genannten Schlussfolgerungen getroffen.
- Die Marktdurchdringungsraten und die Erfolge auf dem Markt unterliegen der Einschätzung des Autors, die Entwicklung auf dem Markt wird vom Autor auf Basis der Recherchen für diese Arbeit erstellt. Als literarische Basis für diese beiden Szenarien fungieren die ÖAMTC-Delphi-Studie „Mobilität 2015/2030“ und die

<sup>290</sup> Vgl. Daten: Statistik Austria, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge -  
bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (abgerufen am 26.07.2010)

SHELL Mobilitätsszenarien „SHEMOS 2035“. Des Weiteren wurde die für diese beiden Arbeiten verwendete Literatur sorgfältig studiert und in die Erstellung mit-einbezogen.

- Der Solarantrieb wird in diesen Szenarien ausgeklammert, da in Österreich die meteorologischen und geografischen Rahmenbedingungen für einen Erfolg dieses Systems nicht gegeben sind. Das Konzept des „Ein-Liter-Autos“ wird zu der Rubrik der Otto- und Diesel-Verbrennungsmotoren hinzugefügt, da es sich hier nur um eine Weiterentwicklung der bekannten und etablierten Technik handelt.
- Änderungen der administrativen Rahmenbedingungen wie Förderungen beim Neuwagenkauf, sich verändernde steuerliche Abgaben und Emissions-Reduktionsbestimmungen werden im Szenario „0-Fall“ ausgeklammert, da deren Entwicklung nicht sicher vorauszusagen ist. Für das Maßnahmen-Szenario wird eine gezielte staatliche Lenkung in Richtung nachhaltige Mobilität angenommen.
- Berechnet werden der Bestand einer Technologie und der Anteil in % (Marktdurchdringungsrate) für jedes Jahr. In dieser Arbeit dargestellt werden allerdings nur die Marktdurchdringungsraten alle 5 Jahre (2010, 2015, 2020, 2025, 2030) um die Anzahl der Grafiken überschaubar zu halten.

## 7.2 Szenario „0-Fall“

Für das Szenario „0-Fall“ wurden die Rahmenbedingungen so festgelegt, wie sich die Entwicklung aus heutiger Sicht am wahrscheinlichsten bis zum Jahr 2030 gestalten würde, ohne dass einschneidende Maßnahmen gesetzt werden („business as usual“). Heutige Trends, wie steigende Spritpreise und zunehmender Absatz an Diesel-PKW's werden berücksichtigt.

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Diesel/Otto-Verbrennungsmotor	4410029	4584594	4538498	4361293	4086145
Hybridantrieb	4414	61065	189937	319119	464077
Alternative Kraftstoffe	0	42276	124959	239339	367866
Batterieelektrischer Antrieb	0	9395	94969	207427	345228
Wasserstoff-Verbrennungsmotor	0	0	24992	95736	186763
Brennstoffzelle	0	0	24992	95736	209401
gesamt	4414443	4697330	4998347	5318650	5659480

Tabelle 31: Gesamtzahlen verschiedener PKW-Antriebe bis 2030 im Szenario 0-Fall<sup>291</sup>

<sup>291</sup> Vgl. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge\\_-\\_bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (abgerufen am 27.07.2010), eigene Berechnung

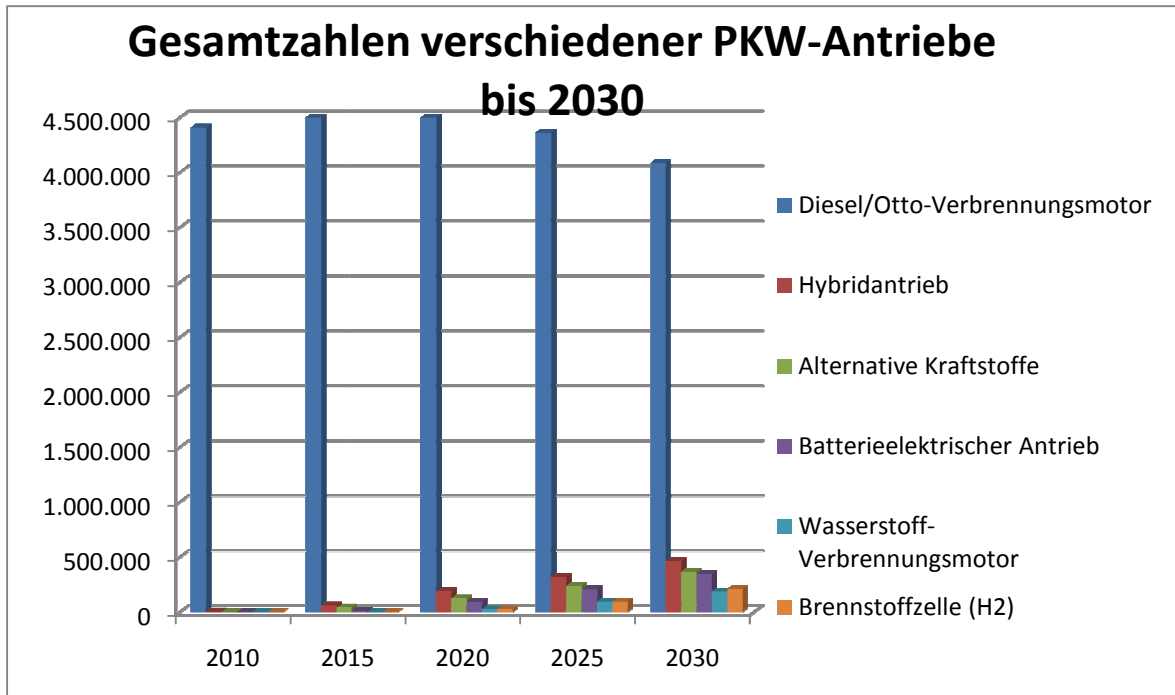


Abb. 62: Gesamtzahl-Grafik bis 2030 im Szenario „0-Fall“

**Diesel/Otto-Verbrennungsmotoren:** In diesem Szenario sinkt die Gesamtzahl nur sehr langsam. Dies liegt vor allem daran, dass der Trend an Dieselfahrzeugen anhält, es werden immer mehr Dieselfahrzeuge angemeldet, der Anteil der Ottomotoren sinkt stetig. Auch hier ist ein Trend zu PKWs mit geringerem Verbrauch festzustellen.

**Hybridantrieb:** Der Trend der letzten Jahre wird fortgesetzt. PKWs mit geringerem Verbrauch werden bei den Kunden wegen der stetig steigenden Betriebskosten immer beliebter. Bis zum Jahr 2030 bleibt der Hybridantrieb der erfolgreichste alternative Antrieb. Auf Grund der hohen Anschaffungskosten bleibt aber auch er ein Nischenprodukt.

**Alternative Kraftstoffe:** Da diese zumeist in Dieselmotoren eingesetzt werden profitieren diese auch von der stetigen Zunahme an Dieselfahrzeugen. Da die Umrüstkosten auch in Zukunft gleich bleiben werden, die Treibstoffkosten allerdings stetig steigen amortisiert sich eine Umrüstung schneller. Das gering ausgebaute Tankstellennetz schreckt allerdings viele potenzielle Kunden ab. Auch in Zukunft werden, nach Einschätzung des Autors, keine oder zumindest nur sehr wenige Modelle ab Werk angeboten.

**Batterieelektrischer Antrieb:** Diese Antriebsform wird sich in diesem Szenario, falls es bis zum Jahr 2050 fortgeführt wird, als Antriebstechnologie der Zukunft erweisen. Einfache Aufladung, bessere Akkutechnologie und vermehrt Strom aus erneuerbaren Energien machen dieses Konzept zur Antriebsart der Zukunft. Bis 2030 allerdings wird auch der batterieelektrische Antrieb nur ein Nischenprodukt bleiben.

**Wasserstoff-Verbrennungsmotor:** Die Wasserstoff-Technologie wird bei Fortschreibung der heutigen Trends erst um 2020 auf den Markt drängen. Verantwortlich dafür sind die noch nicht ausgereifte Technologie und die kompliziert zu errichtende Infrastruktur. Bis

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

2020 sollte es gelungen sein, die Vorurteile bei der Bevölkerung in Bezug auf Wasserstoff abzubauen. Falls der Preis für Wasserstoff in Zukunft wie erwartet sinken sollte, wird die Wasserstoff-Technologie erst ab 2030 in größerem Maße auf den Markt drängen.

*Brennstoffzelle:* Von den beiden Antriebsarten die mit Wasserstoff angetrieben werden wird sich die Brennstoffzelle auf Grund des geringeren Verbrauchs durchsetzen. Doch auch für diese Alternative ist der Betrachtungszeitraum bis 2030 zu kurz gewählt.

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Diesel/Otto-Verbrennungsmotor	99,9%	97,6%	90,8%	82,0%	72,2%
Hybridantrieb	0,1%	1,3%	3,8%	6,0%	8,2%
Alternative Kraftstoffe	0,0%	0,9%	2,5%	4,5%	6,5%
Batterieelektrischer Antrieb	0,0%	0,2%	1,9%	3,9%	6,1%
Wasserstoff-Verbrennungsmotor	0,0%	0,0%	0,5%	1,8%	3,3%
Brennstoffzelle	0,0%	0,0%	0,5%	1,8%	3,7%

Tabelle 32: Marktdurchdringungsraten bis 2030 im Szenario „0-Fall“

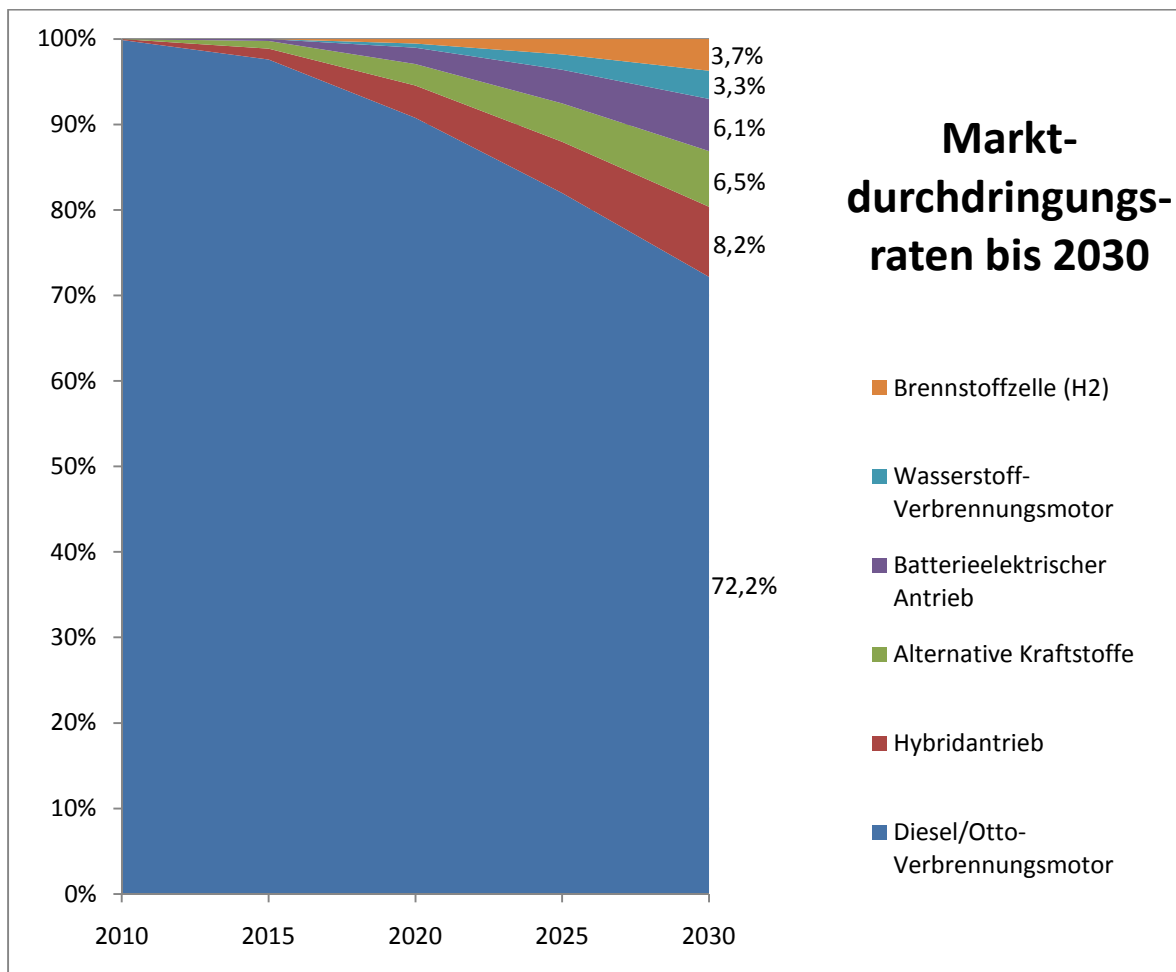


Abb. 63: Marktdurchdringungsraten-Grafik bis 2030 im Szenario „0-Fall“

*Fazit:* Bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen und Trends bleiben die herkömmlichen Verbrennungsmotoren uneingeschränkte Marktführer. Der Anteil der Dieselfahrzeuge am gesamten PKW-Bestand steigt voraussichtlich weiter an. Für biogene Dieselmotoren wird bis zum Jahr 2030 ein Marktanteil von 6,5% erwartet. Der Anteil, der mit Ottomotor angetrieben

PKW sinkt voraussichtlich in den nächsten Jahren stark ab. Ab dem Jahr 2015 beginnt der Markteintritt von Zero-Emission-Fahrzeugen, die eine Marktdurchdringung von knapp 7% im „0-Fall“-Szenario bis 2030 erreichen. Biogene Kraftstoffe werden durch Förderung begünstigt, und erzielen bis 2030 einen Marktanteil von 6,5%. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Kraftstoffe für Dieselfahrzeuge. Die Wasserstoff-Technologie spielt in diesem Szenario eine untergeordnete Rolle, da bis 2030 nur ein Marktanteil von jeweils circa 3% erreicht wird.

### 7.3 Maßnahmen-Szenario

Für das Maßnahmen-Szenario wurde im Gegensatz zum Szenario „0-Fall“ ein Maßnahmenpaket im Hinblick auf eine nachhaltige Verkehrsentwicklung impliziert, dass die zukünftige Entwicklung des Verkehrsgeschehens einer nachhaltigen Entwicklung annähern soll. Die implizierten Maßnahmen sind:

- Stärkere Besteuerung von fossilen Brennstoffen. Dadurch steigen die Treibstoffkosten sofort an.
- Förderung von emissionsarmen Kraftfahrzeugen.
- Kampagnen zur Bewusstseinsbildung und Förderung von ressourcenschonendem Verkehrsverhalten.
- Förderungen und steuerliche Begünstigungen für Forschungen in diesem Bereich, um den technologischen Fortschritt bei alternativen Antriebsformen zu forcieren.

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Diesel/Otto-Verbrennungsmotor	4405614	4429583	3998676	3138004	2484512
Hybridantrieb	4414,44	75157,3	159947	202109	192422
Alternative Kraftstoffe	4414,44	51670,6	159947	335075	418802
Batterieelektrischer Antrieb	0	93946,6	474843	1154147	1669547
Wasserstoff-Verbrennungsmotor	0	23486,7	74975,2	164878	316931
Brennstoffzelle	0	23486,7	129957	324438	577267
gesamt	4414443	4697331	4998345	5318651	5659481

Tabelle 33: Gesamtzahlen verschiedener PKW-Antriebe bis 2030 im Maßnahmen Szenario<sup>292</sup>

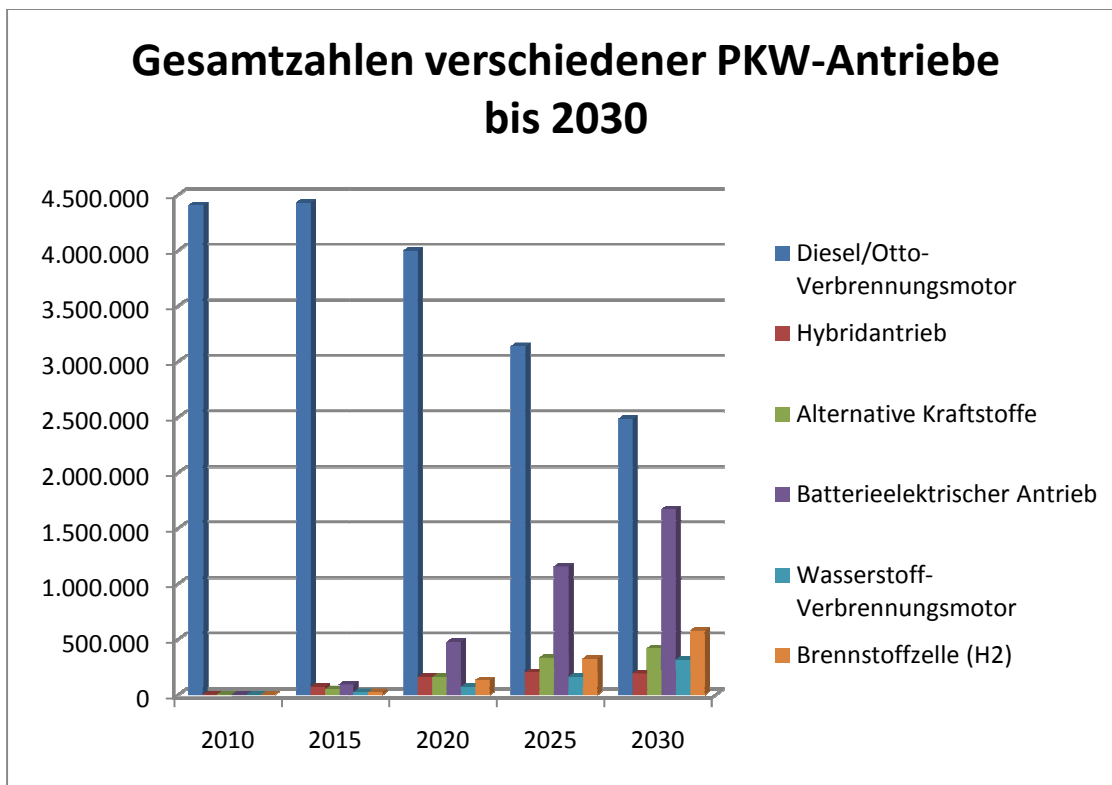


Abb. 64: Gesamtzahl-Grafik bis 2030 im Maßnahmen-Szenario

*Diesel/Otto-Verbrennungsmotor:* Durch die plötzlich gestiegenen Betriebskosten sinken die Verkaufszahlen stark ab. Bis 2015 steigen die Verkaufszahlen an Ermangelung an Alternativen allerdings noch einmal leicht an. Im Jahr 2030 werden weniger als 50% aller PKWs mit Diesel oder Benzin angetrieben.

*Hybridantrieb:* Der Absatz an Hybridantrieben wird in den ersten Jahren stark steigen, danach allerdings bei circa 4% stagnieren, da auch er von den hohen Betriebskosten betroffen ist.

*Alternative Kraftstoffe:* Diese werden vor allem in den ersten Jahren steigen, da sich Umrüstungen nun schneller amortisieren. Langfristig gesehen sind sie jedoch nur eine Übergangsvariante, ihr Marktanteil wird bis 2030 bei circa 8% stagnieren. Vor allem durch das Aufkommen der Wasserstofftechnologie wird der Zuwachs bei alternativen Kraftstoffen verhindert.

*Batterieelektrischer Antrieb:* In diesem Szenario wird sich der batterieelektrische Antrieb als die Zukunftsvariante durchsetzen. Entscheidende Vorteile sind der emissionslose Betrieb, das einfache Aufladen der Akkus und die Verstärkte Nachhaltigkeit durch erneu-

<sup>292</sup> Vgl. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge\\_-\\_bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (abgerufen am 27.07.2010), eigene Berechnung



## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

erbare Energien. Bis zum Jahr 2030 kommt der batterieelektrische Antrieb auf einen Marktanteil von bis zu 30%.

*Wasserstoff-Verbrennungsmotor:* Diese Wasserstoff- Technologie wird in den ersten Jahren von privaten Umrüstungen profitieren, wird aber den Wettstreit mit der Brennstoffzelle verlieren, da der Verbrennungsmotor einen zu hohen Verbrauch aufweist.

*Brennstoffzelle:* Wie bereits bei dem anderen Szenario ist für diese Technologie der Bewertungszeitraum zu knapp gewählt. Die Brennstoffzelle wird auch bei intensiverer Forschung erst ab 2025 eine ernsthafte Alternative auf dem Markt darstellen.

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Diesel/Otto-Verbrennungsmotor	99,8%	94,3%	80,0%	59,0%	43,9%
Hybridantrieb	0,1%	1,6%	3,2%	3,8%	3,4%
Alternative Kraftstoffe	0,1%	1,1%	3,2%	6,3%	7,4%
Batterieelektrischer Antrieb	0,0%	2,0%	9,5%	21,7%	29,5%
Wasserstoff-Verbrennungsmotor	0,0%	0,5%	1,5%	3,1%	5,6%
Brennstoffzelle	0,0%	0,5%	2,6%	6,1%	10,2%

Tabelle 34: Marktdurchdringungsraten bis 2030 im Maßnahmen-Szenario

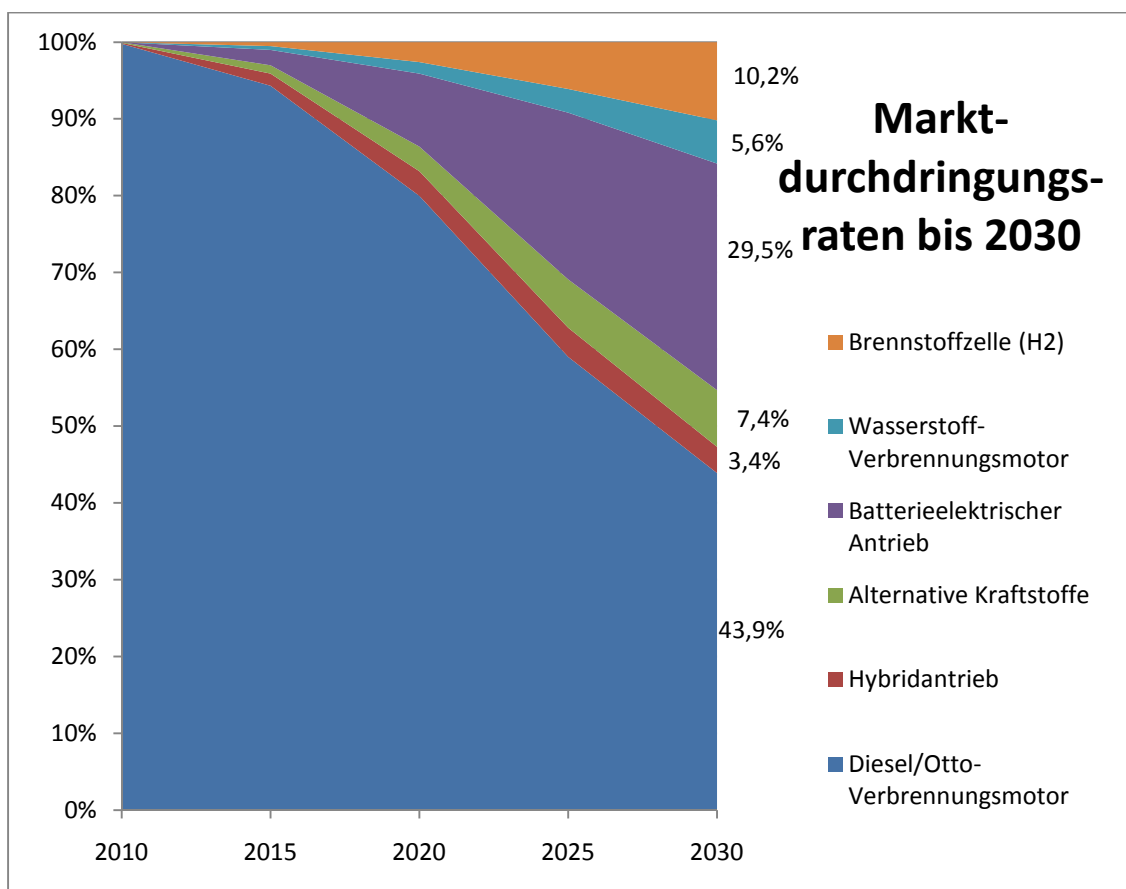


Abb. 65: Marktdurchdringungsraten-Grafik bis 2030 im Maßnahmen-Szenario

*Fazit.* Bedingt durch die signifikante Erhöhung der Betriebskosten und durch die Intensivierung der Forschung sinkt der Marktanteil an benzin- und dieselpbetriebenen PKW bis 2030 auf unter 50% ab. Als mittel- bis langfristig erfolgreichste Alternative zeichnet sich der batterieelektrische Antrieb ab, der bis 2030 einen Marktanteil von circa 30% erreichen kann. Bis 2050 wird auch die Brennstoffzelle technologisch komplett ausgereift sein und eine ernsthafte Konkurrenz darstellen. Der Hybridantrieb wird langfristig von der Bildfläche verschwinden, auch der Wasserstoff-Verbrennungsmotor wird ein Nischenprodukt bleiben.

### **7.4 Vergleich der Szenarien**

Der Vergleich der beiden Szenarien zeigt, dass nur durch den Eingriff in das administrative und regulative Gefüge des Staates durch Förderungen und Besteuerungen die Entwicklung in die richtige Richtung gelenkt werden kann. Durch Bewusstseinsbildung bei der Bevölkerung ist es möglich starre Denkweisen wie Maximalreichweite, die ohnedies nur in den seltensten Fällen benötigt wird, abzubauen. Bei den Antriebsformen werden sich die nachhaltigen Varianten durchsetzen, so wird zum Beispiel der Hybridantrieb nur eine Übergangstechnik zu nachhaltigen Antriebsformen darstellen, da dieser weiterhin fossile Brennstoffe als Primärenergieträger verwendet.

Der batterieelektrische Antrieb wird sich auf Grund seiner zahlreichen Vorteile bis zum Jahr 2030 durchsetzen. Die Brennstoffzelle wird noch etwas länger brauchen bis sie sich auf dem Markt etabliert hat. Gründe dafür werden sein die komplizierte Herstellung des Treibstoffs Wasserstoff, seine schwierige Lagerung und Transport.

Der Solarantrieb wird in Österreich nur in Kombination mit einem batterieelektrischen Antrieb erfolgreich sein können. Das Konzept des Ein-Liter-Autos wird eine Studie des technisch-machbaren bleiben.

Beide Szenarien zeigen jedoch, dass sowohl benzin- als auch dieselpbetriebene PKWs ihren Zenit in puncto Marktdominanz überschritten haben. Bei einem derzeitigen Marktanteil in Österreich von 99,9% kann es nur bergab gehen. Durch die serienreife immer weiterer Antriebsformen in den nächsten 5 Jahren wird der Marktanteil der konventionellen Antriebe stetig sinken, nur das Tempo dieses Marktanteilsverlustes kann heute noch nicht genau vorhergesagt werden.

### 7.4.1 Schlussfolgerungen

Aus den beiden Szenarien an sich und aus einem Vergleich der beiden Szenarien lassen sich Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung auf dem Automobilmarkt ableiten:

- Der Staat muss regulierend eingreifen um eine gewünschte Entwicklung auf dem Markt der PKW-Antriebe zu erreichen. Dieses Eingreifen des Staates ist vor allem dann unerlässlich wenn die Entwicklung auf dem PKW Markt nicht die optimale und gewünschte Entwicklung nimmt. Hier muss vor allem auf die Nachhaltigkeit der Konzepte geachtet werden. Eingriffe des Staates können geschehen durch stärkere Besteuerung von Benzin und Diesel oder durch Förderungen oder Steuererleichterungen beim Kauf von nachhaltigen, alternativen, Personenkraftwagen.
- Bis zum Jahr 2030 werden alle alternativen Antriebsformen, die sich heute teilweise noch im Entwicklungsstadium befinden auf dem Markt erhältlich sein und miteinander konkurrieren. Welche Alternative sich schlussendlich durchsetzt ist heute nicht mit Gewissheit vorherzusagen. Zu erwarten ist allerdings, dass einige wieder vom Markt verschwinden werden, da sich der Einschätzung des Autors nach maximal 2 Alternativen, hier vor allem das Elektroauto und später die Brennstoffzelle, auf dem Markt durchsetzen werden.
- Weiterentwicklungen der heutigen Verbrennungsmotoren, die ebenfalls mit fossilen Energieträgern angetrieben werden, wie Hybridantrieb, das Ein-Liter-Auto und mit Erdgas betriebene PKWs werden nur als Übergangslösungen dienen, bis 2030 wird sich ein nachhaltiges Konzept durchgesetzt haben.
- Die Entwicklung der Preise für Benzin und Diesel kann bis zum Jahr 2030 nicht sicher abgeschätzt werden. Doch gerade diese Entwicklung, die über die Höhe der Betriebskosten entscheidet, wird ein sehr wichtiges Kriterium dafür sein wann und in welchem Ausmaß alternative Antriebe sich auf dem Markt durchsetzen werden. In der ÖAMTC-Delphi Studie geht man von einer Verdopplung des Preises für Benzin und Diesel bis zum Jahr 2030 aus. Dieser Wert scheint angesichts der derzeitigen Entwicklung durchaus realistisch. Diese Preiserhöhung wird zwar durch den weiter sinkenden Verbrauch etwas abgefedert, dennoch werden die Betriebskosten für konventionell betriebene PKWs bis zum Jahr 2030 stark steigen.
- Auch wenn heute bereits die Kyoto-Ziele zu erreichen versucht werden, werden die CO<sub>2</sub>-Belastung und der Ausstoß an Emissionen in Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen. Dies wird sich durch stärkere Besteuerung und durch restriktivere Gesetze auch auf dem PKW-Markt niederschlagen. Dies führt zu einer Verstärkung des Trends zu nachhaltigen Formen der individuellen Mobilität.

- Sowohl die Verkehrsleistung, also die zurückgelegten Kilometer, als auch die Zahl der angemeldeten PKW werden bis 2030 weiterhin leicht steigen. Dies führt zu einer zusätzlichen Belastung der Verkehrsinfrastruktur. Ohne entsprechender Adaptierung werden externe Kosten wie zum Beispiel Stauzeiten, stark ansteigen. Vor allem in den Großstädten wie Wien werden längere Staus zu einer zusätzlichen Belastung für die Bevölkerung werden.

### 7.4.2 Mögliche Handlungsoptionen des Staates

Aus den Szenarien geht eindeutig hervor, dass der Staat auf dem PKW-Markt lenkend eingreifen muss um die gewünschte Entwicklung herbeizuführen. Im folgenden Kapitel werden einige Optionen für staatliches Handeln kurz angedacht und skizziert.

Der Ansatz, alternative Kraftstoffe und Antriebsformen zu fördern und auf den Markt zu bringen, ist zu einem großen Teil politisch motiviert. Dabei spielt vor allem der Klimaschutz durch CO<sub>2</sub>-Vermeidung eine wesentliche Rolle. Vor dem Hintergrund der „Kyoto-Ziele“ ist die Formulierung von nationalen und auch europäischen Zielsetzungen eine entscheidende Voraussetzung, um die Entwicklung alternativer Kraftstoffe und Antriebe sinnvoll zu fördern und zu lenken. Mit dem stetigen Anstieg der Energiepreise rücken außerdem zunehmend Aspekte der Versorgungssicherheit bzw. der möglichst großen Unabhängigkeit von Energieträgerimporten (hauptsächlich Erdöl) in den Fokus der Öffentlichkeit.

Auf nationaler bzw. regionaler Ebene sind positive Beschäftigungseffekte ein Anreiz zur Förderung alternativer, insbesondere biogener Kraftstoffe, die Impulse zur Stärkung des ländlichen Raumes bieten können.

Alternative Kraftstoffe sind aber zum jetzigen Zeitpunkt preislich nicht konkurrenzfähig zu den konventionellen fossilen Kraftstoffen. Daher muss zum einen die Absenkung der Produktionskosten als prioritäre Aufgabe betrachtet werden, während zum anderen gezielte Förderungen notwendig sind, um einen Markteintritt herbeizuführen. Die politische Beschleunigung eines Umstiegs von den konventionellen, auf Erdöl basierenden zu alternativen Treibstoffen im Verkehr kann auf vielfältige Weise erfolgen. Hierbei können folgende Instrumente zur Anwendung gebracht werden:

- **Mengenziele:** Durch die Vorgabe eines Mengenziels wird ein bestimmter Marktanteil an alternativen Kraftstoffen verlangt. Die Umsetzung einer solchen Vorgabe

liegt bei der produzierenden Industrie, d.h. im Falle von Kraftstoffen bei der Mineralölindustrie.

- **Ordnungsrechtliche Vorgaben:** Ordnungsrechtliche Vorgaben regeln den Gebrauch und die Anwendung von Techniken im gesellschaftlichen Rahmen, mit dem Ziel, unerwünschte Effekte wie z.B. Treibhausgasausstoß zu minimieren. Ein Beispiel ist etwa die Einführung von Nullemissionsstandards für bestimmte Schadstoffe und Fahrzeuge.
- **Steuerlich-rechtliche Maßnahmen:** Steuerliche Begünstigungen von gewünschten Effekten und steuerliche Belastungen auf unerwünschte Effekte zählen zu den klassischen Methoden der fiskalischen Lenkungsaktivitäten. Hier kann sowohl beim Kraftstoff als auch bereits bei der Herstellung der Fahrzeuge lenkend eingegriffen werden.
- **Gezielte Technologieförderung:** Während sich die bereits genannten Fördermöglichkeiten als dauerhaft und allgemein geltend verstehen, ist hiervon die Förderung im Rahmen von Pilotprojekten und Nischenanwendungen zu unterscheiden. Sie ist als Anschubfinanzierung meist zeitlich eng begrenzt und wird überdies nur für einen begrenzten Ausschnitt von Anwendungen gewährt.

## 8 Schlussfolgerungen

### *Otto/Dieselmotor*

Diese Motoren, betrieben mit Benzin oder Diesel, sind Marktführer mit einem Anteil von 99,9% in Österreich. Diese Technologie ist technisch ausgereift und wird immer weiter verbessert. Durch diese stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der Motoren werden weiterhin der Energieverbrauch und die durch den Betrieb verursachten Emissionen verringert. Weiterentwicklungen von Otto- und Dieselmotoren haben auch positive Auswirkungen auf PKWs die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden. Auch deren Verbrauch kann durch technische Verbesserungen am Motor selbst reduziert werden.

Durch Effizienzsteigerungen am Dieselmotor kann auch der Verbrauch an Biodiesel oder Pflanzenöl reduziert werden. Durch Verbesserungen am Ottomotor kann der Verbrauch an Methanol, Biogas, LPG und CNG gesenkt werden. Da es sich bei Benzin und Diesel um fossile Energieträger handelt verursacht deren Verbrennung zahlreiche Emissionen, vor allem CO<sub>2</sub> und andere Treibhausgase. Erdöl, der Grundstoff für Benzin und Diesel, ist nur in bestimmtem Maß auf der Erde vorhanden. Seine Verfügbarkeit ist endlich. Wie lange das Erdöl auf der Erde noch abgebaut werden kann steht nicht sicher fest.

Durch Verknappung oder durch höhere Nachfrage steigt der Preis für Benzin und Diesel stetig an. Durch die steigenden Betriebskosten werden Alternativen immer attraktiver. Als Weiterentwicklung der herkömmlichen PKWs kann man das Ein-Liter-Auto betrachten. Hierbei handelt es sich allerdings weniger um einen realitätsnahen Ansatz, sondern vielmehr um das realisieren des technisch Möglichen. Dieses Auto genügt in keiner Hinsicht den heutigen Ansprüchen der Kunden und ist zurzeit in seiner Herstellung zu teuer.

Die Otto- und Dieselmotoren waren für Jahrzehnte die dominante Antriebsform. Sie stellen kostengünstig die gewünschte Leistung parat. Durch die Verknappung der für den Betrieb benötigten Rohstoffe wird die Ära dieser Antriebsformen allerdings bald enden. Veränderte Rahmenbedingungen wie Nachhaltigkeit wie Ökologisierung werden den Trend zu alternativen Antriebsformen und Kraftstoffe in den nächsten Jahrzehnten ebnen.

### *Hybridantrieb*

Als eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Antriebstechnik ist das Hybridauto zu sehen. Ein Dieselmotor wird im optimalen Drehzahlbereich betrieben, dieser treibt einen oder mehrere Elektromotoren an, die wiederum die Räder antreiben. Eine an Bord mitgeführte Batterie speichert zu viel produzierte Energie und Bremsenergie. Dadurch wird der Verbrauch von Diesel gesenkt. Der Hybridantrieb stellt allerdings nur eine Übergangslö-

sung dar, da er weiterhin mit fossilen Energieträgern befeuert wird. Ein Betrieb mit biogenen Kraftstoffen ist allerdings ebenso möglich, wird bis heute allerdings ab Werk nicht angeboten.

Durch die zusätzlich verbauten Aggregate wird der technische Aufbau komplizierter, der Wagen wird fehleranfälliger und schwerer. Des Weiteren sind Hybridautos heute noch zu teuer, die Amortisationsdauer ist zu lang. Durch staatliche Förderungen oder steuerlichen Begünstigungen würde sich die Amortisationsdauer verringern. Kurzfristig ist der Hybridantrieb eine Lösung den Flottenverbrauch zu verringern. Als eine der wenigen Alternativen ist er technisch ausgereift und hat sich auf dem Markt, wenn auch in geringem Ausmaß etabliert.

Die Vorteile sind Bremsenergieerückgewinnung, erhöhte Fahrleistung und eine Verbesserung des Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors durch die Leistungsaddition von Verbrennungs- und Elektromotor. Die Nachteile sind erhöhte Kosten, erhöhte Systemkomplexität und ein erhöhtes Fahrzeuggewicht.

Die zukünftige Entwicklung auf dem Markt in den nächsten 20 Jahren hängt stark von der weiteren Verfügbarkeit von Erdöl und der damit einhergehenden Preisentwicklung für Diesel ab. Steigt der Treibstoffpreis rapide an verliert auch der Hybridantrieb an schnell an Attraktivität. Nicht auf Erdöl basierende Antriebsformen werden dann in größerem Maße auf den Markt drängen.

### *Alternative Kraftstoffe*

Der Betrieb von Otto- und Dieselmotoren mit alternativen Kraftstoffen ist technisch ausgereift und marktfähig. In einigen Ländern sind alternative Kraftstoffe bereits in großem Ausmaß Teil der automobilen Gegenwart: in Brasilien werden 20% aller Wagen mit Ethanol befeuert. PKWs die mit alternativen Kraftstoffen befeuert werden, werden nur sehr selten ab Werk von den Autoherstellern angeboten. Zumeist wird privat umgerüstet. Hier muss man, vor allem bei neueren PKWs, darauf achten die Herstellergarantie nicht zu verlieren. Es sind nicht alle Motoren gleich gut für einen Umbau geeignet, hierfür bieten sich vor allem ältere Motoren an. Neue, komplexere, Motoren müssen oftmals komplizierter umgerüstet werden, was die Amortisationsdauer für diese Investition verlängert.

Ein derzeit bestehendes Problem ist die Herstellung von alternativen Kraftstoffen. Sie ist zuweilen nicht wirtschaftlich genug, oder es bleiben große Energiereserven ungenutzt wie bei Treibstoffen der ersten Generation. Biotreibstoffe der zweiten und dritten Generation sind theoretisch wirtschaftlich effizienter können allerdings zurzeit nicht wirtschaftlich ren-

tabel hergestellt werden. Der Preis für alternative Kraftstoffe wird heute durch Steuerbegünstigungen niedrig gehalten.

Weltweit gibt es bereits zahlreiche Programme zur Förderung alternativer Kraftstoffe. In Brasilien ist der flächendeckende Gebrauch von Ethanol bereits seit den 1980er Jahren Realität. Argentinien ist mit rund 700.000 CNG-Fahrzeugen und 1.000 Tankstellen der größte CNG-Fahrzeug- und Treibstoffmarkt der Welt. Die größte städtische CNG-Busflotte wird gegenwärtig im indischen Dehli betrieben. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass Dehli unter den Städten der Welt mit der höchsten Luftverschmutzung Platz drei einnahm.

Einige Kraftstoffe bieten auch eine langfristig vernünftige Alternative gegenüber fossilen Brennstoffen. So zum Beispiel wird Biodiesel an heimischen Tankstellen immer präsenter. Bei der Produktion und der Verwendung von nachhaltigen Biokraftstoffen muss penibel darauf geachtet werden, dass die Lebensgrundlagen von in der Landwirtschaft tätigen Familien vor allem in der Dritten Welt und in Schwellenländern nicht beeinträchtigt werden. Ein moralisch-ethischer Zweifel bleibt bei vielen Menschen allerdings bestehen. Die Adaptierungen der Tankstellenbetreiber in Form von riesigen Hochdruck-Tanks sind kostspielig und können so der Verbreitung von CNG, Biogas und LPG im Weg stehen.

Erdgas als Kraftstoff bietet aufgrund des höheren Wasserstoffgehaltes Vorteile in Hinblick auf die Emittierung von  $\text{CO}_2$  je MJ von ca. 20% gegenüber Benzin. Weitere Vorteile sind die hohe Oktanzahl von bis zu 130 wodurch keine Aromaten zur Erhöhung der Klopfestigkeit notwendig sind, ein hoher Heizwert sowie eine saubere Verbrennung. Nachteile sind eine hohe Zündenergie, keine schmierende Wirkung und ein hoher Luftbedarf. Daraus ergibt sich bei frei ansaugenden Erdgasmotoren der Nachteil der geringeren Leistungsdichte im Vergleich zu Ottomotoren gleicher Bauart durch den niedrigeren Gemischheizwert von ca. 8 %. Bivalente Fahrzeuge überwiegen heute am Markt. Diese können jedoch den verbrennungsmotorischen Vorteil, den Erdgas bietet, kaum nutzen und haben zudem ein höheres Gesamtgewicht.

Durch die Vielzahl an alternativen Kraftstoffen kann für beinahe alle Bedürfnisse die optimale Lösung gefunden werden. Das noch nicht flächendeckende Tankstellennetz wird ständig weiter adaptiert. Ein entscheidender Faktor für den Erfolg dieser Alternativen wird sein, ob die Automobilhersteller zukünftig ab Werk Modelle für diese Kraftstoffe anbieten. Wird dies in Zukunft der Fall sein besteht die Möglichkeit das alternative Kraftstoffe in den nächsten 20 Jahren in großem Maße auf den Markt drängen.



### *Batterieelektrischer Antrieb*

Große Teile der verwendeten Technik sind seit Jahren ausgereift. Der Elektromotor weist einen sehr guten Wirkungsgrad auf, ist wartungsarm und genügt den Kunden in puncto Beschleunigung, Leistung und Geschwindigkeit. Die Reichweite, ein sehr wichtiges Kriterium für Kunden, kann auf Grund der heute zur Verfügung stehenden Batterietechnik nicht mit den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor konkurrieren. Als heutiges Einsatzgebiet für Elektroautos bietet sich vor allem die Stadt an. Viele der heute produzierten Elektrofahrzeuge sind auf dieses Einsatzgebiet zugeschnitten. Sie sind kleiner dimensioniert, geräuscharm und verursachen vor Ort keine Emissionen.

Die an Bord befindliche Batterie ist sehr groß und schwer, in der Gestaltung ihrer Außenform ist sie wenig flexibel und benötigt daher viel Platz im Innenraum. Auch verliert die Batterie, im Gegensatz zu Benzin und Diesel, Energie nach längerer Standzeit. ZEBRA-Batterien brauchen einen Teil der eigenen gespeicherten Energie um betriebsfähig zu bleiben. Batterien haben eine begrenzte Lebensdauer und sind in der Anschaffung sehr teuer, sie müssen im Regelfall alle 5 bis 10 Jahre getauscht werden.

Reine batterieelektrische Antriebe können auch mit Solarpanelen kombiniert werden. So kann in Zukunft ein Teil der benötigten Energie direkt an Bord durch Sonnenenergie generiert werden. Dieser Anteil steigt mit der technischen Weiterentwicklung der verwendeten Solarzellen.

Batterieelektrische Fahrzeuge sind derzeit in der Herstellung auch bei größeren Stückzahlen um circa 40% teurer als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Ihre Betriebskosten und die Wartungskosten sind allerdings deutlich geringer. Um die hohen Anschaffungskosten für Elektroautos zu senken, setzen derzeit viele Hersteller auf den Einbau von Batterien mit beschränkter Kapazität, was jedoch eine weitere Reduktion der Reichweite mit sich bringt.

Bezieht man die Energieerzeugungskette in den Primärenergieverbrauch von batterieelektrischen Fahrzeugen mit ein, so ergeben sich im Vergleich zu einem modernen Auto mit Verbrennungsmotor bei den Schadstoffemissionen keine nennenswerten Vorteile. Zurzeit sprechen nur der fehlende Schadstoffausstoß vor Ort und die niedrigere Geräusentwicklung für Elektroautos. Die vermehrte Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien kann diese Bilanz in Zukunft zu Gunsten von Elektroautos ändern. Dies gilt als größtes Potenzial von batterieelektrischen Antrieben.

Der Aufladevorgang zu Hause aus der Steckdose dauert bei heutigen Modellen mindestens 6 bis zu maximal 10 Stunden. Die Kunden tolerieren aber nur kürzere Zeiten. Durch Schnellladestationen kann die Dauer auf bis zu 10 Minuten verkürzt werden. Dies ist vor allem bei Überlandfahrten wichtig. Für den täglichen Gebrauch ist die Aufladung über Nacht allerdings vollkommen ausreichend. Hier ist vor allem Bewusstseinsbildung und Information beim Kunden notwendig.

Auf Grund der hohen Anschaffungskosten bietet sich heute ein Einsatz in kleinen Nischengebieten an, wie zum Beispiel Taxis oder Kurierdienste in Städten. Die Marktchancen von batterieelektrischen Fahrzeugen werden mittel- bis langfristig steigen. Ein Großteil der Verbraucher wird erst dann einen Pkw mit rein elektrischem Antrieb kaufen, wenn dieser zu einem vertretbaren Preis die vom Verbrennungsmotor gewohnten Fahrleistungen bringt.

Sollten sich batterieelektrische Autos kosten- und energieeffizient realisieren lassen, so stünden sie in deutlicher Konkurrenz zum Brennstoffzellenfahrzeug. Batterieelektrische Antriebe haben neben der Brennstoffzelle das größte Potenzial für die Zukunft. Elektroautos können auch von Seiten der öffentlichen Hand gefördert werden, etwa durch steuerliche Anreize, durch direkten Zuschuss beim Kauf oder durch die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur. Diese Ladeinfrastruktur ist im Vergleich zu anderen alternativen Antrieben, wie etwa dem Wasserstoff, sehr kostengünstig zu errichten.

Die weitere Entwicklung vor allem bei den verwendeten Batterien wird über die Zukunft von batterieelektrischen Antrieben entscheiden. Im Maßnahmen Szenario wird den Elektroautos bis 2030 das größte Potenzial und die weiteste Verbreitung neben den herkömmlichen Antrieben auf dem PKW-Markt bescheinigt.

### *Solarantrieb*

Solarautos weisen auf Grund des emissionslosen Betriebes, der langfristigen Verfügbarkeit der Rohstoffe und der noch im Entwicklungsstadium befindlichen Technologie ein hohes Potenzial für die Zukunft auf. Die Energie der Sonne steht auf der Erde, nach menschlichen Maßstäben, noch unbegrenzt lange zur Verfügung. Allerdings sind nicht alle Regionen der Welt für Solarautos gleich gut geeignet. In Österreich ist ein Einsatz von reinen Solarautos bei heutigem Stand der Technik weder sinnvoll noch möglich. Die bis jetzt erzielbaren Leistungen in puncto Beschleunigung, Platzangebot und Aussehen genügen noch nicht den Wünschen der Kunden auf dem Markt.

Ein großer Vorteil ist, dass rein solarbetriebene PKWs keine Versorgungsinfrastruktur benötigen, da sie ihre Energie komplett von der Sonne beziehen. Dies führt aber auch schon zu einem entscheidenden Nachteil. Sonne ist leider nicht immer und überall vorhanden. Diese PKWs können also nicht immer betrieben werden. Die mitgeführten, kleinen, Batterien, es wird bei Solarautos nämlich sehr stark auf das Gewicht geachtet, reichen heute nur für Reichweiten von bis zu 250 Kilometer. In anderen Regionen der Welt, etwa rund um den Äquator, wo mehr und öfter die Sonne als Energielieferant zur Verfügung steht, haben Solarmobile eine größere Marktchance als zum Beispiel in Europa und Nordamerika.

Die verwendeten Solarpanels weisen einen noch sehr geringen Wirkungsgrad auf, viel Energie geht durch Reflexion und Reibungsverluste (als Reibungsverluste versteht man bei Solarzellen Energieverluste die bei Materialübergängen, etwa von der Siliziumschicht zum Kabel, etc. entstehen) verloren. Leistungsfähigere Solarzellen sind allerdings noch um ein Vielfaches teurer als herkömmliche Silizium-Zellen. Viele heute hergestellte Solarautos funktionieren nur als Prototypen, ein Markteintritt ist mit diesen nicht geplant. Sie dienen vielmehr dazu darzustellen, was technisch möglich ist. Sie dienen als Wegweiser für die Zukunft.

Kurzfristig werden sich am Markt vor allem Hybridmodelle etablieren. Diese sind weiterhin auf die Steckdose zur Energieaufnahme angewiesen, haben an ihren Oberflächen aber Solarpanels, die die Betriebskosten weiter senken sollen.

### *Wasserstoff-Verbrennungsmotor*

Die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger in einem weiter entwickelten Verbrennungsmotor wird als mögliche Brückentechnologie bis zur Marktreife der Brennstoffzelle gesehen.

Der große und entscheidende Vorteil der Wasserstoff-Technologie ist der, dass der verwendete Rohstoff, Wasser, so gut wie unbegrenzt auf der Erde vorkommt. Zwar kann Wasserstoff auch aus Erdöl, Kohle und anderen nicht-regenerativen Energieträgern gewonnen werden, die Herstellung wird sich in Zukunft allerdings auf Wasser, Windenergie und Biomasse konzentrieren. Die Technik des Verbrennungsmotors ist auf Grund der jahrzehntelangen Forschung und Weiterentwicklung ausgereift, auch die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff ist technisch ausgereift. Durch bivalenten Betrieb mit Wasserstoff und Benzin kann die Reichweite entscheidend erhöht werden und kurzfristig die negativen Auswirkungen des kaum ausgebauten Wasserstoff-Tankstellennetzes abgefedert werden. Ein weiterer Vorteil von Wasserstoff ist die emissionsfreie Verbrennung. Durch

den Betrieb entsteht nur Wasserdampf. Auch der Lärmpegel ist durch die bessere Verbrennung geringer.

Die Wasserstoff-Technologie hat aber nicht nur Vorteile sondern zum jetzigen Zeitpunkte auch noch gravierende Nachteile. Die Herstellung von Wasserstoff, die Speicherung, der Transport und die Verdichtung sind sehr energieintensiv. Bei der gesamten Herstellungskette entstehen bei der Gewinnung durch Strom (UCTE-Mix) mehr Emissionen als bei Benzin und Diesel. Wasserstoff ist ein sehr flüchtiger chemischer Stoff, er verdampft auch in komplett geschlossenen Behältern. Die Verdichtung oder Verflüssigung benötigt circa 40% des Energiegehalts der verdichteten Menge. Die Energieintensität bei der Herstellung ist aus chemischen und physikalischen Gründen nicht zu vermeiden, es können in Zukunft lediglich die Kosten weiter gesenkt werden.

Wasserstoff ist vor allem wegen seiner hohen Brennrate (die Brennrate beschreibt die Entflammbarkeit und die Geschwindigkeit der Verbrennung. Der Wert wird zumeist in Zentimeter je Sekunde (cm/sec) angegeben) gut geeignet als Kraftstoff. Ein Nachteil ist die reduzierte Leistungsabgabe eines Motors im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren was hauptsächlich durch den geringen volumetrischen Heizwert verursacht wird. Die meisten anderen Probleme, wie Klopfen, unkontrolliertes Zünden usw. sind bereits gelöst worden.

Auf Grund der geringen Dichte von Wasserstoff kann ein LKW oder eine Zuggarnitur nur eine geringe Menge transportieren. Um den steigenden Bedarf zu decken werden also mehr LKWs benötigt. Wasserstoff-Pipelines sind sehr teuer in der Anschaffung, auch verdampft der Wasserstoff aus den Röhren. Wasserstoff kann derzeit effizient und gewinnbringend nur in Großanlagen hergestellt werden, dies treibt die Transportkosten zu den Tankstellen in die Höhe. Die Herstellung in Kleinanlagen oder im Auto selbst ist vermutlich erst langfristig effizient.

Bei der Bevölkerung bestehen große Bedenken in Hinblick auf die Gefährlichkeit von Wasserstoff. Diese sind teilweise auch gut begründet. Wasserstoff ist sehr leicht entzündlich, ist geruchs- und farblos. Eine Wasserstoffflamme ist mit freiem Auge kaum sichtbar da sie auf Grund des fehlenden Kohlenstoffs im UV-Bereich verbrennt. Allerdings hat Wasserstoff bei Unfällen mit Bränden auch Vorteile. Im Gegensatz zu Benzin und Diesel verspritzt der Wasserstoff beim Verbrennen nicht sondern verflüchtigt sich in der Luft oder verbrennt sauber. Unfälle bei denen das ganze Auto in Flammen steht sind so gut wie ausgeschlossen. Die heute zur Verfügung stehenden Tanks, sowohl Hochdruckbehälter als auch Kryo-Behälter, sind sicher, die Technologie ist ausgereift. Allerdings sind in Zukunft noch leistungsfähigere Tanks notwendig um die von den Kunden gewünschte Reichweite sicherzustellen. Der Einbau des Tanks, vor allem im bivalenten Betrieb,

braucht auf Grund seiner zylindrischen Form viel Platz und verkleinert den Stauraum im Innern.

Die Herstellung in Großserie von Personenkraftwagen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren hat bis jetzt noch kein Hersteller gewagt. Obwohl die Technik für die Serienproduktion bereits ausgereift ist sprechen einige Punkte noch gegen eine Großserienproduktion. Die fehlenden Tankstellen machen vor allem bei monovalentem Betrieb spontanes Fahren, ohne vorher nach Tankstellen zu suchen, unmöglich. Auch sind die Kosten in der Produktion und somit auch in der Anschaffung noch deutlich zu hoch.

Als einer der großen PKW-Hersteller nimmt hier BMW eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ein. Bereits 1999 stellte BMW erste Prototypen vor. Die BMW Testflotte mit Luxuslimousinen wurde allerdings 2009 eingestellt, eine Einstellung der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet ist damit nicht verbunden.

Mittel- bis langfristig soll laut Meinung zahlreicher Experten der Bedarf an Wasserstoff nur noch aus Biomasse gewonnen werden. Das Potenzial dafür ist vorhanden, einzig die Technologie ist noch nicht ausgereift und serien-einsatztauglich.

### *Brennstoffzelle*

Personenkraftwagen mit Brennstoffzellen-Antrieb werden als Prototypen bereits seit Jahren hergestellt und auf Autosalons präsentiert. Waren die ersten Fahrzeuge reine Konzeptstudien so schreitet die Technologie immer weiter voran. Die Anforderungen der Kunden in puncto Reichweite, Tankdauer, Platzangebot und Leistung nähern sich immer weiter jenen von herkömmlichen PKWs an.

Die Technologie der Brennstoffzelle ist ausgereift, es gibt verschiedenen Typen mit verschiedenen Stärken und Schwächen. Auch hier werden die Schwächen, etwa die schlechte Kaltstart-Fähigkeit, kontinuierlich verbessert. Von dem Einsatz einer Brennstoffzelle in Verbindung mit Wasserstoff als Energieträger erwartet man aufgrund des höheren Wirkungsgrades der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor einen geringeren Verbrauch.

Der Wasserstoff wird zurzeit am günstigsten aus Erdgas gewonnen. Dieses Konzept ist allerdings nicht nachhaltig, da Erdgas ein fossiler Energieträger ist. Der Preis für einen Kilogramm Wasserstoff beträgt zurzeit etwa 8€. Dieser Preis wird allerdings bei vermehrtem Einsatz regenerativer Energien bei der Herstellung sinken. Man rechnet in Zukunft mit einem Preis von circa 3,5 € je Kilogramm Wasserstoff. Die Abschätzung der Kostenentwicklung von Brennstoffzellen spielt eine Schlüsselrolle für die Bewertung der Konkurrenzfähigkeit von BZ-Fahrzeugen gegenüber konventionellen Antrieben. Entscheidend ist

die Abschätzung der Kosten, mit denen im besten Fall bei einer Massenproduktion zu rechnen ist. Dies ist jedoch in der Praxis mit Unsicherheiten behaftet, da zukünftige Entwicklungen und Technologiesprünge prinzipiell nicht vorhersagbar sind.

Wie schon beim Wasserstoffverbrennungsmotor beschrieben liegt die zentrale Schwäche des Konzepts in der Herstellung, der Speicherung und im Transport des Wasserstoffs. Diese Vorgänge sind sehr energie- und somit auch kostenintensiv.

Eine weitere entscheidende Schwäche ist die beinahe nicht vorhandene Versorgungsinfrastruktur. Im gesamten deutschsprachigen Raum gibt es kaum mehr als ein paar Dutzend Tankstellen. Viel zu wenig um die Versorgung flächendeckend garantieren zu können. Durch Gemeinschaftsinitiativen soll bis 2015 das Tankstellennetz ausgebaut werden.

Da bis heute alle Fahrzeuge im den Status eine Prototyps nicht überschritten und auch die Fahrzeuge aus Kleinserien nicht regulär verkauft wurden ist bis heute kein Verkaufspreis für Brennstoffzellen-Fahrzeuge bekannt.

Ein wichtiger Vorteil der Wasserstoff-Technologie ist die Verfügbarkeit des benötigten Rohstoffs.

Die Entscheidung, ob sich die Technologie durchsetzt oder nicht, wird davon abhängen ob eine flächendeckende Infrastruktur in absehbarer Zeit errichtet werden kann und ob die Preise für Wasserstoff wie erwartet sinken werden.

### *Vergleich der alternativen Antriebsformen*

Alle zukünftigen Antriebsformen müssen sich mit Benzin und Diesel vergleichen lassen. Der derzeitige Stand der Technik unterscheidet sich bei den einzelnen Alternativen beträchtlich. Während vor allem alternative Kraftstoffe bereits technisch ausgereift sind befinden sich die Brennstoffzelle und das Solarauto noch mehr oder weniger im Entwicklungsstadium. Auch bei batterieelektrischen Antrieben gibt es noch Verbesserungspotenzial, diese sind aber dennoch bereits voll einsatzfähig.

Bei der für den jeweiligen Antrieb und Kraftstoff benötigten Versorgungsinfrastruktur gibt es noch beträchtliche Unterschiede. Während alternative Kraftstoffe wie Biodiesel und Erdgas immer häufiger an Tankstellen zu finden sind, existiert für Wasserstoff noch überhaupt keine Infrastruktur. Diese ist auch nur unter Einsatz hoher Kosten zu errichten. Eine flächendeckende Versorgungsinfrastruktur für Elektroautos ist zwar auch noch nicht vorhanden, ist aber ungleich kostengünstiger zu errichten. Solarautos, die ihre gesamte benötigte Energie aus dem Sonnenlicht gewinnen, benötigen überhaupt keine Versorgungsinfrastruktur.

Auch bei der Nachhaltigkeit unterscheiden sich einige Alternativen immens. Alternative Kraftstoffe wie Erdgas oder aus Erdgas gewonnenes Methanol für Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren werden aus fossilen Energieträgern gewonnen. Doch auch bei in nachhaltiger Weise gerinnbaren Stoffen wie Wasserstoff kann bei der Erzeugung fossile Energie eingesetzt werden. Die gesamte Herstellungskette kann dann unter Umständen sogar emissionsintensiver als bei Benzin und Diesel ausfallen. Weitere Konzepte wie der Hybridantrieb und Niedrigenergieautos bauen weiterhin auf nicht nachhaltigem Diesel.

Bei den Emissionen muss unterschieden werden zwischen Emissionen bei der Herstellung der Treibstoffe und bei Emissionen die durch den Betrieb des PKW verursacht werden. Ein Emissionsloser Betrieb des PKW ist bei der Brennstoffzelle und bei Elektroautos möglich. Bei alternativen Kraftstoffen ist ein zuweilen emissionsärmerer Betrieb als mit Benzin und Diesel möglich. Bei der Herstellung des Kraftstoffes und der damit einhergehenden Emissionsbelastung kommt es oft auf den verwendeten Strom an. Stammt der Strom aus Sonnenenergie, aus Wasserkraft oder aus Biomassekraftwerken ist er weitestgehend CO<sub>2</sub>-neutral. Stammt der Strom aus dem EU-UCTE-Strom-Mix werden nur geringfügig weniger Emissionen erzeugt als bei der Herstellung von Benzin und Diesel.

Ein wichtiger Punkt um auf dem Markt zu bestehen ist es, den Ansprüchen der potentiellen Käufer zu genügen. Reichweiten wie bei herkömmlichen PKWs sind zumeist nur im bivalenten Betrieb möglich. Auch das Platzangebot der verschiedenen Alternativen hängt stark von den verbauten Aggregaten ab. Ein Hochdrucktank oder Batterien benötigen viel Platz im Innenraum. Auch der Tankvorgang, der bequem sein und kurz dauern soll, unterscheidet sich bei den einzelnen Alternativen beträchtlich. Die Tankdauer bei Elektroautos dauert mehrere Stunden. Das Tanken von Wasserstoff ist für Kunden gewöhnungsbedürftig.

Auch die konzipierten Verwendungszwecke von alternativen PKWs unterscheiden sich beträchtlich. So zum Beispiel sind Elektroautos heute zumeist als kleine Stadtautos konzipiert. Als Firmenautos oder Taxis mit hohen täglichen Wegelängen kommen Brennstoffzellenautos oder PKW mit bivalentem Antrieb in Frage. Elektroautos mit geringeren Reichweiten eignen sich für diesen Einsatzzweck nicht. Biodiesel ist auf Grund seines markanten Geruchs der Abgase nach Frittierfett nicht optimal als Stadtauto geeignet.

Bei den Kosten, sowohl den Betriebskosten als auch bei den Anschaffungskosten, unterscheiden sich die Alternativen stark. Bei der Anschaffung sind Hybridautos noch sehr teuer, dafür sind die Betriebskosten niedriger. Auch Elektroautos sind in der Anschaffung noch teurer als herkömmliche PKWs, dafür sind ihre Betriebskosten viel niedriger. Preise für Brennstoffzellenautos sind heute leider noch nicht bekannt.

### *Szenarien*

Die Szenarien sollen unter stark vereinfachten Bedingungen zeigen wie sich der Automobilmarkt in den nächsten 20 Jahren entwickeln kann.

Das Szenario „0-Fall“ sieht eine Fortschreibung der derzeitigen Trends voraus. Dabei wird sich die Entwicklung hin zu nachhaltigen Alternativen nur sehr langsam vollziehen. 2030 werden immer noch circa 70% aller PKWs mit Benzin oder Diesel betrieben werden. Der Markteintritt von Alternativen wird nur sehr langsam voranschreiten, so wie es bei Hybridfahrzeugen in den letzten 10 Jahren der Fall war. Ohne staatliche Eingriffe wird keine Alternative einen höheren Marktanteil als 10% erreichen können. Auch ist es noch sehr ungewiss welche Alternative sich als die dominante herauskristallisieren wird. Auch die Zeitpunkte des Markteintritts unterscheiden sich bei einzelnen Alternativen sehr stark. Elektroautos und alternative Kraftstoffe werden früher auf den Markt kommen als Brennstoffzellen und der Wasserstoff-Verbrennungsmotor.

Das Maßnahmen-Szenario setzt starke Eingriffe in den nächsten Jahren voraus. Durch einen sprunghaften Anstieg der Benzin- und Dieselpreise, gepaart mit Investitionen in die Forschung und Entwicklung, werden Alternativen früher attraktiver. Hier wird sich kurzfristig vor allem das Elektroauto durchsetzen. Mittelfristig wird die Brennstoffzelle einen hohen Marktanteil erreichen, der bis 2030 allerdings noch nicht sein Maximum erreicht hat. Von den Wasserstoff-Technologien wird sich die Brennstoffzelle gegen den Verbrennungsmotor auf Grund des geringeren Verbrauchs durchsetzen. Technologien die weiterhin auf fossile Brennstoffe setzen wie der Hybridantrieb werden in ihrem Wachstum gehemmt und verbleiben bei einem geringen Marktanteil.

Der Staat hat eine Vielzahl von Eingriffsmöglichkeiten um die gewünschte Entwicklung auf dem PKW-Markt voranzutreiben. Dazu zählen Gebote, Verbote, Förderungen und Strafen. Welches Instrument wo eingesetzt wird kann heute noch nicht vorhergesagt werden.

Um bereits heute die Entwicklungen auf dem Automobilmarkt in die richtige Richtung zu lenken sollte der Staat nachhaltige Technologien und vor allem deren Weiterentwicklung stärker fördern. Dies schafft sowohl Arbeitsplätze als auch Investitionen in Zukunftstechnologien.



## 9 Zusammenfassung

Individuelle Mobilität nimmt in den heutigen Gesellschaften einen immer wichtigeren Stellenwert ein. In Industrienationen werden die durchschnittlich täglich zurückgelegten Wegestrecken immer länger. So zum Beispiel stieg die durchschnittliche Tagesweglänge in Österreich an einem Werktag 1995 von 29 km auf 43 km im Jahr 2005.

In Schwellenländern wie China, Indien und Brasilien nimmt der Grad der Motorisierung immer weiter zu. Diese verstärkte Nachfrage nach Mobilität steht im Gegensatz zu dem nicht wachsenden Angebot an fossilen Brennstoffen, die als Ausgangspunkt für Benzin und Diesel dienen. Diese Rohstoffe sind nur in begrenztem Maße auf der Erde vorhanden.

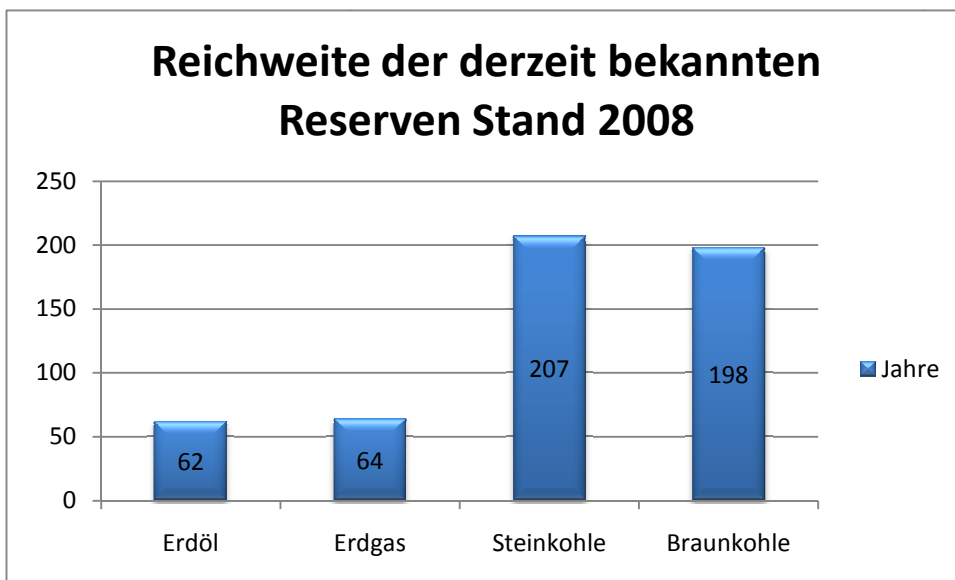


Abb. 66: Reichweite der derzeit bekannten Reserven 2008

Des Weiteren entstehen bei deren Verbrennung im Motor schädliche Treibhausgase die negative Auswirkungen auf die Atmosphäre und auf die Fauna und Flora der Erde haben.

Doch wie geht die Menschheit mit diesem essentiellen Problem um? Es werden alternative Antriebsformen und alternative Kraftstoffe entwickelt die Benzin und Diesel aus fossilem Erdöl ersetzen sollen. Doch die reine technische Verwirklichung eines neuen Konzeptes ist erst der halbe Weg. Diese Alternativen müssen auf dem Markt bestehen können. Sie müssen bei der Erwartungshaltung der Käufer, bei der Reichweite und bei den Kosten mit benzin- und dieselpbetrieben PKWs konkurrieren können um auf dem Markt eine ernsthafte Alternative darzustellen.

Diese Alternativen wurden durch den Autor zunächst gesammelt, nach langer Recherche-tätigkeit in Fachliteratur und in online verfügbaren wissenschaftlichen Dokumenten wurde in Absprache mit dem betreuenden Professor eine Auswahl der zu untersuchenden Antriebskonzepte und Treibstoffe getroffen. Die beim Erstellen dieser Arbeit verwendeten Methoden sind Literaturrecherche in Büchern und online. In dieser Arbeit verwendete und zitierte Autoren sind Sven Geitmann, Joseph J. Romm, Bernhard Gerl, Helmut Eichlseder und auch eine Vielzahl an Organisationen die sich mit diesem Thema auseinandersetzen. Die in dieser Arbeit dargestellten Szenarien wurden durch den Autor selbst entworfen, als Vorlage dienten die Shell Mobilitätsszenarien 2025 und Berechnungen des VCÖ und des ÖAMTC.

Die Ausgangssituation in Österreich sieht so aus, dass alternative Antriebe und auch alternative Kraftstoffe zurzeit noch beinahe bedeutungslos sind. Mit einer Marktdurchdringungsrate von 99,9% im Jahr 2009 halten benzin- und dieselpetriebene Personenkraftwagen eine de facto Monopolstellung. Auch bei diesen Antrieben und Motoren wird immer weiter geforscht. Die Effizienz wird gesteigert, der Durchschnittsverbrauch wird gesenkt. Die Anzahl der zugelassenen Personenkraftwagen steigt kontinuierlich an, was den die Effizienzsteigerungen und somit die verringerten Emissionen wieder ausgleicht. Durch welche Alternativen die herkömmliche Technologie verdrängt wird kann noch nicht sicher gesagt werden.

Zurzeit wird noch an vielen verschiedenen Fronten entwickelt und geforscht. Welche Alternative sich schlussendlich als die Dominante herauskristallisieren wird kann man noch nicht mit Bestimmtheit sagen. Bei den Alternativen kann zwischen verschiedenen Varianten unterschieden werden:

- Die Optimierung und technische Weiterentwicklung herkömmlicher Otto- und Dieselmotoren bei weiterer Verwendung fossiler Energieträger (Hybridantrieb, Niedrigenergieautos)
- Die Optimierung und technische Weiterentwicklung herkömmlicher Ottomotoren bei Verwendung von Wasserstoff (Wasserstoff-Verbrennungsmotor)
- Substituierung der Treibstoffe bei Otto- und Dieselmotoren (CNG, LPG, Biogas, Biodiesel, Pflanzenöl).
- Umstieg auf den Elektromotor mit Strom aus verschiedenen Quellen (batterieelektrischer Antrieb, Solarauto)
- Umstieg auf die Brennstoffzelle und Betrieb mit Wasserstoff oder Methanol

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Diese verschiedenen Energieträger können mit verschiedenen Motorentypen kombiniert werden.

Motor	Verbrennungs= motor	Elektromotor	Verbrennung/ Elektro Kombi- nation	Brennstoffzelle
Energieträger				
Erdöl				
Erdgas				
biologische Kraftstoffe				
elektrischer Strom				
Sonnen= energie				
Wasserstoff				

Abb. 67: Kombination von Energieträgern und verschiedenen Motortypen

Legende:



.....Kombination aus Motortyp und Energieträger funktioniert



.....Kombination aus Motortyp und Energieträger funktioniert nicht

Alle oben genannten Alternativen weisen Vor- und Nachteile bei ihrem Einsatz auf. Doch was muss der Antrieb der Zukunft alles können. Die folgende Aufzählung zeigt die maximalen Anforderungen und Bedingungen die für einen optimalen Grad an Nachhaltigkeit im motorisierten Individualverkehr benötigt werden:

- Die Produktion des PKWs erfolgt aus soweit wie möglich aus erneuerbaren oder zumindest recyclingfähigen Rohstoffen
- Der Treibstoff wird komplett aus erneuerbaren Energieträgern unter geringstmöglicher Emissionsbelastung gewonnen
- Der Betrieb des PKW verursacht keine Emissionen, ist geräusch- und geruchslos
- Die Betriebskosten sind nicht höher als bei heutigen Benzin- und Diesel PKWs

- Die Leistungsdaten, das Platzangebot, die Reichweite und das allgemeine Handling entsprechen heutigen PKWs

Der Hybridantrieb, hier als Weiterentwicklung des Dieselmotors zu sehen, kann kurzfristig den Flottenverbrauch merklich reduzieren, allerdings wird hier weiterhin auf einen fossilen Brennstoff als Energieträger gesetzt. Dies lässt das Konzept auf längere Sicht gesehen wenig nachhaltig erscheinen, nur eine Weiterentwicklung hin zu alternativen, biogenen, Kraftstoffen kann diesem Konzept einen längerfristigen Erfolg bescheren. Bei steigenden Treibstoffpreisen werden spritsparende PKWs immer attraktiver für potentielle Käufer.

Alternative Kraftstoffe können aus zahlreichen Ausgangsprodukten hergestellt werden. Erdgas als fossiler Energieträger scheidet als nicht-nachhaltige Variante für die Zukunft aus. Methanol, Biodiesel und Biogas können aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Deren Herstellung ist aber zum heutigen Zeitpunkt nur durch Subventionen und Steuerbegünstigungen gewinnbringend. Der technische Fortschritt bei diesen noch neuen Alternativen kann hier allerdings noch Effizienzsteigerungen bewirken.

Der batterieelektrische Antrieb zeichnet sich aus durch seine niedrigen Betriebskosten, durch seinen komplett emissionslosen Betrieb und durch die Tatsache aus, dass eine öffentliche Versorgungsinfrastruktur vergleichsweise kostengünstig zu errichten ist. Das hohe Gewicht der Batterien und deren noch zu kurze Lebensdauer bieten noch Anlass für technische Weiterentwicklungen. Entscheidend für die Nachhaltigkeit bei diesem Konzept ist, aus welcher Quelle der Strom für die Batterien gewonnen wird. Stammt der Strom aus erneuerbaren Energien wie Wasser, Biomasse oder Sonne werden beinahe keine Emissionen verursacht. Stammt der Strom aus der Steckdose aus dem EU-Strom-Mix werden bei der Erzeugung des elektrischen Stroms große Mengen an Emissionen verursacht.

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor kann emissionslos betrieben werden. Auch die Gewinnung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien kann emissionslos von statten gehen. Bei der Erzeugung des Wasserstoffs aus dem EU-Strom-Mix entstehen hingegen eine große Menge an Emissionen (87g CO<sub>2</sub> Äquivalent je km). Allerdings sprechen die hohen Preise von Wasserstoff und dessen energie- und kostenintensive Herstellung, Transport und Speicherung noch gegen das Konzept.

Die Brennstoffzelle weist im Vergleich zum Verbrennungsmotor einen niedrigeren Verbrauch auf. Diese Technologie arbeitet ebenfalls komplett emissionslos, das einzige Abfallprodukt ist reiner Wasserdampf. Allerdings steht auch hier die Herstellung des Was-

serstoffs im Vordergrund. Gelingt es, Wasserstoff aus erneuerbaren Energien in großer Menge zu wirtschaftlich vernünftigen Preisen herzustellen, kann die Brennstoffzelle zu einem Erfolg werden.

Die je nach Alternative verursachten Emissionen sind ebenfalls ein wichtiges Kriterium für den Erfolg einer Alternative. Hier muss unterschieden werden zwischen den Emissionen die rein durch den Betrieb des PKW anfallen („Tank to Wheel“) und den Emissionen für die komplette Kette, also von der Herstellung der Treibstoffe bis zum Betrieb („Well to Wheel“). Die folgende Grafik zeigt, dass beinahe alle Alternativen in Hinsicht auf die komplette Kette zumindest etwas besser sind als Benzin und Diesel, jedoch einige keine entscheidenden Vorteile bieten.

CO<sub>2</sub> ist das bekannteste klimabeeinflussende Gas (Treibhausgas). Daher wird auch oft das Gefährdungspotenzial von weniger bekannten Gasen in eine äquivalente CO<sub>2</sub>-Menge umgerechnet. Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent wird dabei als Gramm pro verbrauchte KWh beim Endverbraucher angegeben.<sup>293</sup>

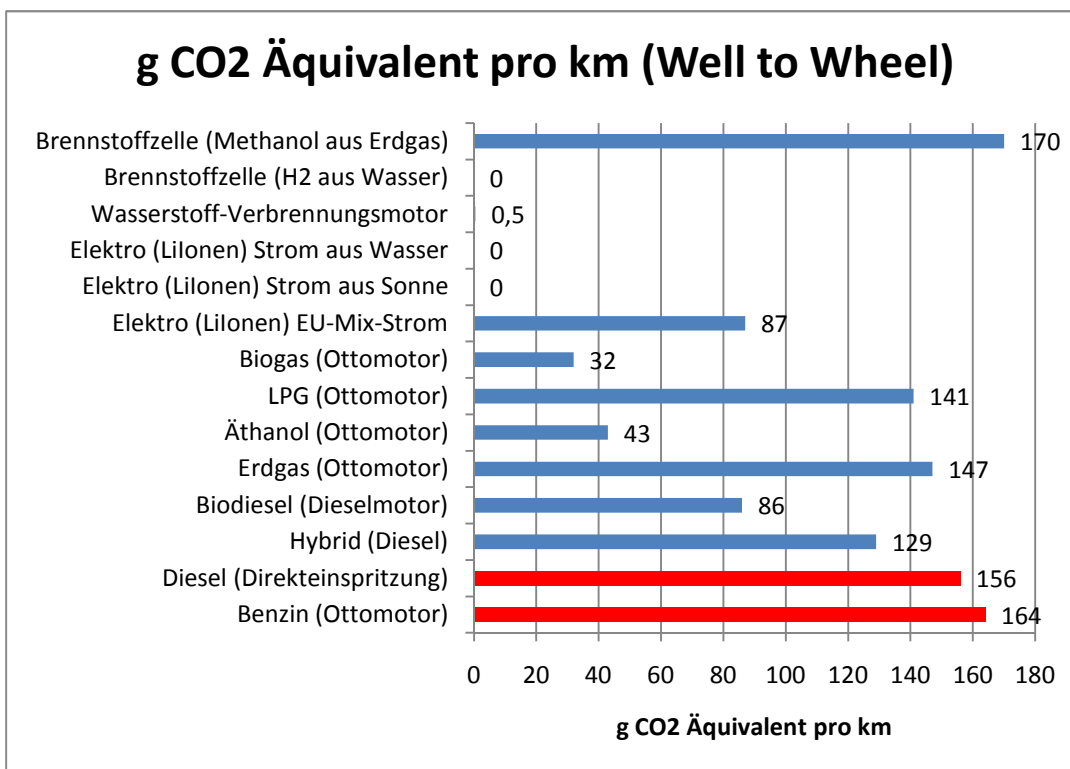


Abb. 68: g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km (Well to Wheel)

Bei der Verwendung von Methanol aus Erdgas als Treibstoff für eine Brennstoffzelle entstehen die meisten Emissionen in der kompletten Kette (Well to Wheel). Bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff spielt es in puncto Emissionen ebenfalls eine wichtige Rolle auf welche Weise der verwendete Wasserstoff hergestellt wird. Bei der Herstellung

<sup>293</sup> <http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/co2-aequivalent.htm> (abgerufen am 23.08.2010)

aus Wasser- oder Sonnenenergie werden beinahe keine Emissionen erzeugt. Bei der Herstellung aus dem EU-Strom-Mix entstehen 196 g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km. Genauso verhält es sich bei den batterieelektrischen Antrieben. Wird der Strom aus Wasser- oder Sonnenenergie gewonnen fallen keine Emissionen an. Bei der Verwendung des EU-Strom-Mix entstehen 87 g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km. Bei den alternativen Kraftstoffen für Otto- und Dieselmotoren schneiden Biogas und Äthanol am besten ab. Deren Herstellung ist allerdings kosten- und zeitintensiv.

Der Betrieb der PKW an sich verursacht ebenfalls Emissionen. Diese werden in der folgenden Grafik dargestellt.

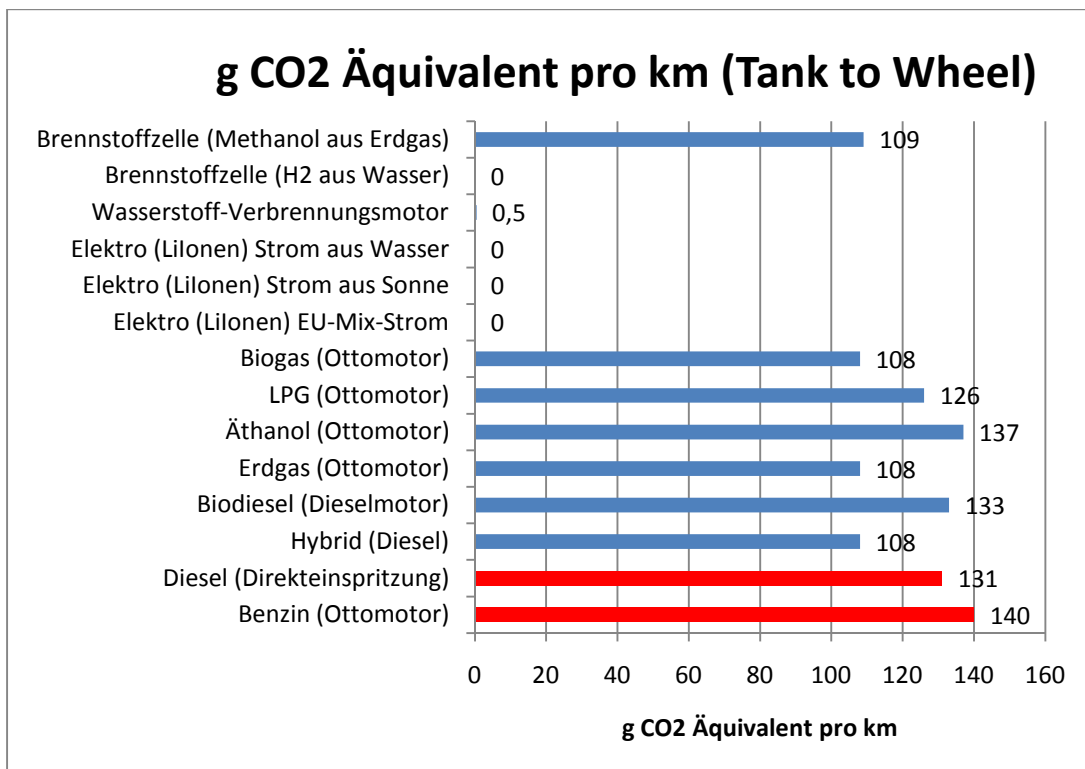


Abb. 69: g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro km (Tank to Wheel)

Hier spielt es vor allem eine wichtige Rolle woher die Energie für den Treibstoff kommt. Der Betrieb eines Elektroautos verursacht vor Ort keine Emissionen. Kommt der Strom aus der Batterie aus dem handelsüblichen EU-Strom-Mix fallen durchschnittlich dennoch 87 g CO<sub>2</sub> Äquivalent pro Kilometer an. Bei alternativen Kraftstoffen in Ottomotoren ergeben sich nur sehr geringe Vorteil gegenüber Benzin, auch die Brennstoffzelle, eine eigentlich, fortschrittliche Technologie verursacht beim Betrieb mit Methanol aus Erdgas beinahe so viel Emissionen wie Benzin und Diesel.

Aus der Berechnung der Szenarien lässt sich klar ablesen, dass eine unkontrollierte Entwicklung auf dem Markt für PKW-Antriebe wenig zielführend ist. Das Maßnahmen-Szenario zeigt deutlich, dass der Staat hier regulierend mittels Förderungen, Begünsti-

gungen und Steuerungen eingreifen muss um eine raschere Entwicklung zu nachhaltigen und ökologisch sinnvoller Alternativen zu gewährleisten.

Ausblick:

Der Inhalt dieser Arbeit legt nahe, weiterführende Betrachtungen nicht auszuschließen sondern ein Monitoring der Entwicklungen auf dem Sektor der PKW-Antriebe durchzuführen. So ist es für die Relevanz dieser Arbeit sehr wichtig die alternativen Motoren und Kraftstoffe weiterhin in Hinblick auf ihre Marktanteile zu beobachten. Im Jahr 2030 kann ein Vergleich mit den Szenarien dieser Arbeit gezogen werden. Auch sind die zukünftigen Entwicklungen im technischen Bereich heute noch nicht abzusehen.

## 10 Abkürzungsverzeichnis

<b>ABS</b> .....	Anti-Blockier-System
<b>ASR</b> .....	Anti-Schlupf-Regelung
<b>BTX</b> .....	Stoffgemisch aus Benzol, Toluol, und Xylol
<b>CNG</b> .....	Compressed Natural Gas
<b>CO</b> .....	Kohlenstoffmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b> .....	Kohlenstoffdioxid
<b>C<sub>w</sub>-Wert</b> .....	Strömungswiderstandskoeffizient
<b>CZ</b> .....	Cetanzahl
<b>ESP</b> .....	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>EU</b> .....	Europäische Union
<b>IAA</b> .....	Internationale Automobil Ausstellung
<b>kWh</b> .....	Kilowattstunde
<b>LPG</b> .....	Liquefied Petroleum/Propane Gas
<b>MIV</b> .....	Motorisierter Individualverkehr
<b>Mj</b> .....	Megajoule
<b>NiCd</b> .....	Nickel-Cadmium
<b>NiMH</b> .....	Nickel-Metallhydrid
<b>NO<sub>x</sub></b> .....	Stickoxide
<b>O<sub>2</sub></b> .....	Wasserstoff
<b>PKW</b> .....	Personenkraftwagen
<b>ROZ</b> .....	Oktanzahl
<b>SWOT</b> .....	Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats
<b>TDI</b> .....	Dieselmotoren mit Direkteinspritzung
<b>VW</b> .....	Volkswagen
<b>Wh/kg</b> .....	Wattstunden je Kilogramm, Leistungsdichte



## 11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erdölverbrauch nach Sektoren .....	17
Abb. 2: Jährliches Bevölkerungswachstum im Jahr 2007 .....	22
Abb. 3: Jährlicher pro Kopf Erdöl-Verbrauch 2008 .....	23
Abb. 4: Derzeit bekannte Reserven an Erdöl 2008 .....	25
Abb. 5: Reichweite der derzeit bekannten Reserven.....	25
Abb. 6: Entwicklung des Rohölpreises von 1861 bis 2008 .....	26
Abb. 7: Wesentliche Bestimmungsfaktoren des Ölpreises .....	27
Abb. 8: Abweichung der EU-15 Staaten vom Kyoto-Zielpfad 2004.....	30
Abb. 9: Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr in Österreich von 1990 bis 2005 .....	31
Abb. 10: Kohlendioxid aus dem Straßenverkehr auf Basis des in Österreich getankten Kraftstoffes von 1990 bis 2005.....	31
Abb. 11: Modal Split nach Altersklassen in Österreich 1995 .....	32
Abb. 12: Hubkolbenmaschine .....	44
Abb. 13: Kreiskolbenmaschine.....	44
Abb. 14: Viertaktverfahren (hier bei einem Ottomotor, siehe die Zündkerzen) .....	45
Abb. 15: Zweitaktverfahren .....	46
Abb. 16: Leistungskurve Ottomotor.....	48
Abb. 17: Leistungskurve Dieselmotor.....	49
Abb. 18: Ultra-Leicht-Strategie.....	51
Abb. 19: Seriennahe Version VW L1.....	57
Abb. 20: Daihatsu UFE III .....	57
Abb. 21: VW Up! Lite .....	59
Abb. 22: Destillationskolonne.....	61
Abb. 23: Katalytisches Cracken .....	62
Abb. 24: Kombination von Energieträgern und Motortypen .....	65
Abb. 25: Serieller Hybridantrieb .....	67
Abb. 26: Paralleler Hybridantrieb .....	68
Abb. 27: Leistungsverzweigter Hybridantrieb.....	69
Abb. 28: Betriebsstrategien in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der geforderten Leistung.....	72
Abb. 29: Toyota Prius .....	76
Abb. 30: Vergleich alternativer Kraftstoffe.....	92
Abb. 31: Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen für Elektroautos.....	95
Abb. 32: Primärenergieträger 2008.....	101
Abb. 33: Primärenergiebedarf in Österreich 2008 .....	102

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

Abb. 34: Peugeot iOn.....	107
Abb. 35: LUIS 4U green.....	108
Abb. 36: Tesla Roadster .....	109
Abb. 37: Funktionsprinzip einer Solarzelle .....	111
Abb. 38: Solarauto NUNA 3 .....	112
Abb. 39: Monokristalline Solarzelle .....	113
Abb. 40: Polykristalline Solarzelle .....	114
Abb. 41: Solarauto „bluecar“ von Pininfarina.....	118
Abb. 42: FIAT Phylla.....	120
Abb. 43: Sky Ace TIGA.....	121
Abb. 44: Brandtestreihe für Wasserstoff- (links) und Benzin- (rechts) Tanks.....	131
Abb. 45: Wasserstoff-Tankstellennetz in Europa.....	134
Abb. 46: Fiat Panda Aria.....	137
Abb. 47: BMW Hydrogen 7 .....	138
Abb. 48: Brennstoffzelle von Grove.....	142
Abb. 49: Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle .....	144
Abb. 50: Prinzip AFC .....	145
Abb. 51: Prinzip DMFC .....	146
Abb. 52: Prinzip NT-PEMFC .....	147
Abb. 53: Prinzip PAFC .....	148
Abb. 54: Prinzip MCFC .....	149
Abb. 55: Prinzip SOFC.....	150
Abb. 56: Mercedes Benz B-Klasse F-CELL .....	153
Abb. 57: Opel Hydrogen 4 .....	154
Abb. 58: Liter Benzinäquivalent pro 100 km (komplette Kette) .....	166
Abb. 59: Liter Benzinäquivalent pro 100 km (nur Fahrzeug).....	167
Abb. 60: g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (komplette Kette).....	168
Abb. 61: g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (nur Fahrzeug) .....	169
Abb. 62: Gesamtzahl-Grafik bis 2030 im Szenario „0-Fall“ .....	173
Abb. 63: Marktdurchdringungsraten-Grafik bis 2030 im Szenario „0-Fall“ .....	174
Abb. 64: Gesamtzahl-Grafik bis 2030 im Maßnahmen-Szenario .....	176
Abb. 65: Marktdurchdringungsraten-Grafik bis 2030 im Maßnahmen-Szenario.....	177
Abb. 66: Reichweite der derzeit bekannten Reserven 2008.....	193
Abb. 67: Kombination von Energieträgern und verschiedenen Motortypen .....	195
Abb. 68: g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (Well to Wheel).....	197
Abb. 69: g CO <sub>2</sub> Äquivalent pro km (Tank to Wheel).....	198

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktionszahlen deutscher Automobilhersteller von 1894 bis 1903 .....	38
Tabelle 2: Automobilproduktion nach Unternehmen 2008.....	39
Tabelle 3: Technische Daten VW L1.....	56
Tabelle 4: Technische Daten Daihatsu UFE III.....	58
Tabelle 5: Technische Daten VW Up! Lite:.....	59
Tabelle 6: Vergleich Dieselkraftstoff - Benzin,.....	63
Tabelle 7: Hauptkenngrößen elektrischer Energiespeicher,.....	70
Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Modellvarianten des Honda Civic .....	74
Tabelle 9: Geschätzte Amortisationsdauer Honda Civic Hybrid .....	75
Tabelle 10: Praxisbeispiele Hybrid,,.....	77
Tabelle 11: Eigenschaften von Biodiesel.....	80
Tabelle 12: Eigenschaften von Pflanzenölen .....	82
Tabelle 13: Eigenschaften von Bio-Ethanol.....	83
Tabelle 14: Eigenschaften von LPG.....	85
Tabelle 15: Umweltvorteile von LPG gegenüber Benzin .....	86
Tabelle 16: Schadstoffreduzierung beim Einsatz von CNG .....	88
Tabelle 17: Technische Daten verschiedener Batterietypen,.....	98
Tabelle 18: Reichweite von Elektroautos, .....	101
Tabelle 19: Verfügbarkeit von Lithium.....	105
Tabelle 20: Vergleich LUIS 4U green und LUIS 4U 1.5L.....	106
Tabelle 21: Wirkungsgrade von Solarzellen .....	116
Tabelle 22: Technische Daten bluecar und Phylla, .....	119
Tabelle 23: Parameter Sky Ace Tiga.....	120
Tabelle 24: Eigenschaften von Wasserstoff .....	128
Tabelle 25: Zündungsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff und Benzin .....	129
Tabelle 26: Mazda5 Hydrogen RE Hybrid Spezifikationen .....	138
Tabelle 27: Betriebskosten BMW Hydrogen 7.....	139
Tabelle 28: Vergleich Opel und Mercedes Benz, .....	154
Tabelle 29: Well-to-Wheel-Analyse .....	166
Tabelle 30: Marktdurchdringungsraten 2009.....	171
Tabelle 31: Gesamtzahlen verschiedener PKW-Antriebe bis 2030 im Szenario 0-Fall...	172
Tabelle 32: Marktdurchdringungsraten bis 2030 im Szenario 0-Fall.....	174
Tabelle 33: Gesamtzahlen verschiedener PKW-Antriebe bis 2030 im Maßnahmen Szenario .....	176
Tabelle 34: Marktdurchdringungsraten bis 2030 im Maßnahmen Szenario .....	177

## 13 Literaturverzeichnis

**Back, M.** (2005). Prädikative Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Karlsruhe: Universitätsverlag.

**Bossel, U.** (2006). Wasserstoff löst keine Energieprobleme. Erschienen in: TECHNOLOGIEFOLGENABSCHÄTZUNG – Theorie und Praxis, Nr.:1, 15. Jahrgang – April 2006

**Claus, M.** (2008). Kfz-Elektronik: Hybridantriebe Im PKW. Fachhochschule Trier

**Cornel, Stan** : Alternative Antriebe für Automobile : Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger , ISBN 9783540275213

**Dachverbandes Agrarforschung e.V. und Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.** (2006). Biodiesel, Pflanzenöl, Ethanol - Bestandsaufnahme und ökonomische Perspektiven in Deutschland. Braunschweig, 26. Oktober 2006 ([http://www.agrarforschung.de/download/PPT\\_Schmitz.pdf](http://www.agrarforschung.de/download/PPT_Schmitz.pdf))

**Dauensteiner A.** (2002) Der Weg zum Ein-Liter-Auto. Berlin: Springer Verlag

**E-Control**, Stromkennzeichnungsbericht 2009, digital abrufbar unter: <http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/oeko-energie/dokumente/pdfs/Stromkennzeichnungsbericht%202009.pdf> (abgerufen am 19.09.2010)

**Eichlseder, Helmut** : Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, ISBN 978-3-8348-0478-5

**Falk, Dürschner, & Remmers.** (2005). Photovoltaik für Profis. Berlin: Professionell & Praxisnah. S. 121ff

**Fischer, V.** (2000). Benzin – Der Weg des „Schwarzen Goldes“ vom Erdinneren bis zur Zapfsäule. München: GRIN Verlag

**Flotow, Paschen** von [Hrsg.] : Die Brennstoffzelle - Ende des Verbrennungsmotors? ISBN 3-258-06138-6

**Frenzen, S.** (1998). Erdöl und Erdgas – Eine fachwissenschaftliche Abhandlung. München: GRIN Verlag

**Friedrich H.** (2007) Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung? Villigen: Paul Scherrer Institut PSI

**Geitmann, Sven** : Wasserstoff & Brennstoffzellen , ISBN 3-87125-095-3

**Geitmann, Sven** (2008): Alternative Kraftstoffe. Oberkrämer: Hydrogeit Verlag.

**Gerl, Bernhard** : Innovative Automobilantriebe , ISBN 3-478-93275-0

**Green, M.** (2000): Photovoltaics - Technologically Overview. Energy Policy 28.

**Grohe, Russ,** Otto- und Dieselmotoren Vogel Industrie Medien

**Hucho W.** (2008) Aerodynamik des Automobils. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag

**IEA International Energy Agency.** (2009) Key World Energy Statistics 2009. Online abrufbar unter: [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key\\_stats\\_2009.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf) (abgerufen am 15.06.2010)

**Kemp W.** (2001): Das Folgerecht. Wie die Kunst der Gegenwart ihre Zukunft sichert. In: Merkur. Deutsche Zeitschrift für europäisches Denken. Heft-Nr.629/630

**Lindner D.** (2008) Alternative Kraftstoffe. Frankfurt: August von Goethe Literaturverlag

**Luther, Preiser, & Willeke.** (2003). Solar Modules and Photovoltaic Systems. Heidelberg: Springer Verlag

**Marwede M., Knoll M.** (2010). Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

**Romm, Joseph J.** : Der Wasserstoff-Boom , ISBN 978-3-527-31570-3

**Scherf C.** (2008) Die postfossile Blackbox: Alternative Antriebsaggregate im Rückspiegel vergangener Verkehrsvorhaben. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

**Tetzlaff, K.H.** (2005). Bio-Wasserstoff – Eine Strategie zur Befreiung aus der selbstverschuldeten Abhängigkeit vom Öl. Norderstedt: Books on Demand GmbH

**Tetzlaff, K.H.** (2008). Wasserstoff für alle – Wie wir der Öl-, Klima-, und Kostenfalle entkommen. Norderstedt: Books on Demand GmbH

**U.S. Geological Survey**, Mineral Commodity Summaries Lithium, January 2009, online abrufbar unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2009-lithi.pdf> (abgerufen am 21.06.2010)

**VCÖ**: Potenziale von Elektro-Mobilität , ISBN 3-901204-61-X

**Volkswagen AG**. Umweltbericht 1999/2000. 24ff digital unter: [http://www.volkswagen.de/etc/medialib/vwcms/virtualmaster/de/Unternehmen/mobilitaet\\_und\\_nachhaltigkeit/downloads/umweltberichte.Par.0012.File.pdf/umweltbericht\\_1999\\_2000\\_deutsch.pdf](http://www.volkswagen.de/etc/medialib/vwcms/virtualmaster/de/Unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/downloads/umweltberichte.Par.0012.File.pdf/umweltbericht_1999_2000_deutsch.pdf) (abgerufen am 26.05.2010)

**Wirtschaftskammer Österreich**: Energiepolitischen Strategien bis 2015. Seite 9. Digital abrufbar unter: [http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:upm3yPfNUIYJ:portal.wko.at/wk/dok\\_detail\\_file.wk%3FAnID%3D1%26DocID%3D1008477%26ConID%3D373878+Energiepolitische+Strategien++Energiepolitische+Ziele+der+WK%C3%96+bis+2015&hl=de&pid=bl&srcid=ADGEESghrBOgKrnUal4lohtxfPkKuzhIGnYSCEXe8PeNo2cDpgFBFkXm1VHxXH3DWA sMLokmOwSxltHNeAcsU5qAK1Plh3gFXjQH53kBAlybbUmo7dSAmFhLOq1B-1PHroFMUI44rh7&sig=AHIEtbTin-XRnUdRahFc6hMo9usuLwVN7A](http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:upm3yPfNUIYJ:portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk%3FAnID%3D1%26DocID%3D1008477%26ConID%3D373878+Energiepolitische+Strategien++Energiepolitische+Ziele+der+WK%C3%96+bis+2015&hl=de&pid=bl&srcid=ADGEESghrBOgKrnUal4lohtxfPkKuzhIGnYSCEXe8PeNo2cDpgFBFkXm1VHxXH3DWA sMLokmOwSxltHNeAcsU5qAK1Plh3gFXjQH53kBAlybbUmo7dSAmFhLOq1B-1PHroFMUI44rh7&sig=AHIEtbTin-XRnUdRahFc6hMo9usuLwVN7A) (abgerufen am 26.05.2010)

**WKO** Die Mineralölindustrie. (2010). Tankstellenstatistik 2009. Online abrufbar unter: [http://portal.wko.at/wk/startseite\\_dst.wk?AnID=1&DstID=308](http://portal.wko.at/wk/startseite_dst.wk?AnID=1&DstID=308) (abgerufen am 05.05.2010)

**Wörgetter, M.** (o.J.) Biotreibstoffe der ersten und zweiten Generation – ein technischer Überblick. Lehr- und Forschungszentrum Francisco Josephinum. Wieselburg

**Würfel, P.** (2008): Physik der Solarzellen, 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

<http://4u.luis.de/elektroauto/techn-daten> (abgerufen am 08.07.2010)

<http://4u.luis.de/elektroauto/techn-daten> (abgerufen am 18.06.2010)

[http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy\\_conv.html](http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy_conv.html) (abgerufen am 23.08.2010)

<http://blog.atonline.de/2008/07/28/algen-biokraftstoffe-der-dritten-generation/> (abgerufen am 24.05.2010)

[http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VW\\_L1.JPG&filetimestamp=20100425214738](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VW_L1.JPG&filetimestamp=20100425214738) (abgerufen am 26.05.2010)

[http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Elektroautos](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Elektroautos) (abgerufen am 18.06.2010)

[http://forum.avtoindex.com/foto/data/media/5/sky\\_ace\\_tiga\\_solar\\_car\\_1.jpg](http://forum.avtoindex.com/foto/data/media/5/sky_ace_tiga_solar_car_1.jpg) (abgerufen am 20.07.2010)

<http://futurezone.orf.at/stories/1631226/> (abgerufen am 05.05.2010)

<http://karmakonsum.de/wp-content/uploads/2009/05/2007teslaroadster-full1.jpg> (abgerufen am 18.06.2010)

<http://oica.net/category/production-statistics/> (abgerufen am 21.05.2010)

<http://ww2.autoscout24.de/bericht/brennstoffzellen-auto-kommt/wasserstoff-marsch/4319/139472/> (abgerufen am 06.07.2010)

<http://www.all-electronics.de/news/33964-H2+Mobility:+Initiative+zum+Aufbau+einer+Wasserstoffinfrastruktur+in+Deutschland?PHPSESSID=a23adff693a8faf9fe08bab537612ce6> (abgerufen am 06.07.2010)

[http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/used\\_cars/a2/pdf.Par.0005.File.pdf/a2\\_a0\\_12tdi\\_45kw\\_0302.pdf](http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/used_cars/a2/pdf.Par.0005.File.pdf/a2_a0_12tdi_45kw_0302.pdf) (abgerufen am 26.05.2010)

[http://www.autobild.de/artikel/fahrbericht-tesla-roadster\\_219545.html](http://www.autobild.de/artikel/fahrbericht-tesla-roadster_219545.html) (abgerufen am 18.06.2010)

[http://www.autobild.de/artikel/opel-hydrogen4-fuer-auto-bild\\_812213.html](http://www.autobild.de/artikel/opel-hydrogen4-fuer-auto-bild_812213.html) (abgerufen am 06.07.2010)

<http://www.automobilesreview.com/uploads/2009/05/opel-hydrogen4-in-berlin.jpg> (abgerufen am 06.07.2010)

<http://www.auto-motor.at/Auto/Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/Fiat-News/Fiat-Phylla-Elektroauto.html> (abgerufen am 20.07.2010)

<http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/mercedes-benz-b-klasse-f-cell-geht-in-kleinserie-1484203.html> (abgerufen am 06.07.2010)

<http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/mercedes-benz-b-klasse-f-cell-geht-in-kleinserie-1484203.html> (abgerufen am 06.07.2010)

<http://www.autoplenum.de/Bilder/testreports/STG20091203040617/VW-Up-Lite.jpg> (abgerufen am 26.05.2010)

[http://www.bgr.bund.de/nn\\_322848/DE/Themen/Energie/Erdgas/erdgas\\_node.html?nnn=true](http://www.bgr.bund.de/nn_322848/DE/Themen/Energie/Erdgas/erdgas_node.html?nnn=true) (abgerufen am 21.05.2010)

[http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficient\\_dynamics/phase\\_2/clean\\_energy/bmw\\_hydrogen\\_7.html](http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/efficient_dynamics/phase_2/clean_energy/bmw_hydrogen_7.html) (abgerufen am 08.07.2010)

<http://www.daihatsu.com/brand/motorshow/tokyo05/ufe3/index.html> (abgerufen am 26.05.2010)

<http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/index.shtml> (abgerufen am 21.06.2010)

<http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Erwerbbar> (abgerufen am 17.06.2010)

<http://www.erdgasautos.at/fahrzeuge/> (abgerufen am 21.05.2010)

<http://www.erdgasautos.at/tanken/cngt> (abgerufen am 12.05.2010)



[http://www.esys.org/technik/Solarzellen\\_auf\\_Yachten-Polykristalline\\_Solarzelle.jpg](http://www.esys.org/technik/Solarzellen_auf_Yachten-Polykristalline_Solarzelle.jpg) (abgerufen am 19.07.2010)

<http://www.gasauto.info/> (abgerufen am 21.05.2010)

<http://www.gas-tankstellen.de/menu.php?jump=preise> (abgerufen am 21.05.2010)

<http://www.greengear.de/notwendigkeit-oelknappheit/> (abgerufen am 21.05.2010)

<http://www.grueneautos.com/2010/06/elektroauto-luis-4u-green/> (abgerufen am 18.06.2010)

<http://www.grueneautos.com/kategorie/antriebskonzepte/elektroautos/> (abgerufen am 18.06.2010)

<http://www.grueneautos.com/kategorie/antriebskonzepte/ethanol-fahrzeuge/> (abgerufen am 25.05.2010)

<http://www.grueneautos.com/schlagwort/schnellladestation/> (abgerufen am 21.06.2010)

<http://www.h2stations.org/> (abgerufen am 09.06.2010)

<http://www.heise.de/autos/artikel/Piechs-Ein-Liter-Auto-nun-im-Museum-Autovision-418303.html> (abgerufen am 26.05.2010)

[http://www.honda.de/content/automobile/modelle\\_civic\\_hybrid\\_technische\\_daten.php](http://www.honda.de/content/automobile/modelle_civic_hybrid_technische_daten.php) (abgerufen am 12.05.2010)

[http://www.hybrid-autos.info/Bilder/Auto\\_Daihatsu\\_UFE\\_III\\_2006\\_gross.jpg](http://www.hybrid-autos.info/Bilder/Auto_Daihatsu_UFE_III_2006_gross.jpg) (abgerufen am 26.05.2010)

[http://www.hybrid-autos.info/Daihatsu\\_UFE\\_III\\_2006.html](http://www.hybrid-autos.info/Daihatsu_UFE_III_2006.html) (abgerufen am 26.05.2010)

<http://www.hybrid-autos.info/elektro-fahrzeuge/> (abgerufen am 17.06.2010)

<http://www.iwr.de/solar/technik/typen.html> (abgerufen am 19.07.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

<http://www.mapexplorer.com/v3/plus/raiffeisen-leasing/?tnr=3&mnr=1#> (abgerufen am 12.05.2010)

[http://www.maxi-gas.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=48&Itemid=91](http://www.maxi-gas.de/index.php?option=com_content&task=view&id=48&Itemid=91) (abgerufen am 21.05.2010)

[http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/passengercars/home/new\\_cars/models/s-class/w221/overview/drivetrain\\_chassis.0007.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/s-class/w221/overview/drivetrain_chassis.0007.html) (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.motor-talk.de/news/mazda5-hydrogen-re-hybrid-im-praxistest-t1893917.html> (abgerufen am 09.10.2010)

<http://www.mundoautomotor.com/eco/wp-content/uploads/2008/11/fiat-phylla-00.jpg> (abgerufen am 20.07.2010)

<http://www.oeamtc.at/a1118744/> (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.oeamtc.at/sprit/> (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.oeamtc.at/sprit/?state=&fuelType=10&daysLimit=1&ZIP=&spritaction=doSimpleSearch&search=Anzeigen> (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.oeamtc.at/sprit/?state=&fuelType=9&daysLimit=1&ZIP=&spritaction=doSimpleSearch&search=Anzeigen> (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.panther-batterien.de/deutsch/infocenter/batterie-lexikon.html> (abgerufen am 10.06.2010)

<http://www.peugeot.de/newsletter/peugeot/2009-12/artikel2.php> (abgerufen am 18.06.2010)

<http://www.pinfarina.com/index/storiaModelli/Pininfarina-BlueCar.html> (abgerufen am 20.07.2010)

<http://www.propan.de/fahrzeuge/fahrzeuge.html> (abgerufen am 25.05.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

[http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrW&Dokumentnummer=LRWI\\_B100\\_000&ResultFunctionToken=4b1993de-97d7-4b48-9bcd-39192cc62442&Titel=&Typ=&Index=&ImRisSeit=Undefined&ResultPageSize=50&Suchworte=garage](http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=LrW&Dokumentnummer=LRWI_B100_000&ResultFunctionToken=4b1993de-97d7-4b48-9bcd-39192cc62442&Titel=&Typ=&Index=&ImRisSeit=Undefined&ResultPageSize=50&Suchworte=garage) (abgerufen am 21.05.2010)

[http://www.speedace.info/solar\\_cars/solar\\_car\\_images/solar\\_Car\\_Nuna\\_3\\_at\\_Zandvoort.jpg](http://www.speedace.info/solar_cars/solar_car_images/solar_Car_Nuna_3_at_Zandvoort.jpg) (abgerufen am 19.07.2010)

[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge\\_-\\_bestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html) (abgerufen am 26.07.2010)

[http://www.teslamotors.com/performance/electric\\_power.php](http://www.teslamotors.com/performance/electric_power.php) (abgerufen am 18.06.2010)

[http://www.toyota.de/cars/new\\_cars/prius/specs.aspx](http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/specs.aspx) (abgerufen am 12.05.2010)

<http://www.treehugger.com/toyota-new-2010-prius-hybrid-photo-01.jpg> (abgerufen am 26.05.2010)

<http://www.umwelt.fiat.de/> (abgerufen am 09.06.2010)

<http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/co2-aequivalent.htm> (abgerufen am 23.08.2010)

<http://www.varta-automotive.de/index.php?id=37&L=1> (abgerufen am 10.06.2010)

[http://www.verbund.at/cps/rde/xchg/internet/hs.xsl/10172\\_493.htm](http://www.verbund.at/cps/rde/xchg/internet/hs.xsl/10172_493.htm) (abgerufen am 08.07.2010)

[http://www.volkswagen.de/vwcms/master\\_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet\\_und\\_nachhaltigkeit/technik\\_innovation/antriebe/drei\\_zwei\\_eins.popup.html](http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/technik_innovation/antriebe/drei_zwei_eins.popup.html) (abgerufen am 26.05.2010)

[http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info\\_center/de/themes/2009/12/volkswagen\\_s\\_up\\_lite\\_concept\\_consumes\\_just\\_2\\_44\\_l\\_100\\_km.html?context=CMS](http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/de/themes/2009/12/volkswagen_s_up_lite_concept_consumes_just_2_44_l_100_km.html?context=CMS) (abgerufen am 26.05.2010)

## Alternative Antriebsformen von Personenkraftwagen

[http://www.welt.de/motor/article715480/Wie\\_viel\\_Kohlendioxid\\_produziert\\_mein\\_Auto.html](http://www.welt.de/motor/article715480/Wie_viel_Kohlendioxid_produziert_mein_Auto.html) (abgerufen am 26.05.2010)

<http://www.worldsolarchallenge.org/> (abgerufen am 20.07.2010)

<http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html> (abgerufen am 27.07.2010)

<http://zeitgeist.yopi.de/cool/2355/bluecar-solar-auto-von-pininfarina-schon-2010> (abgerufen am 20.07.2010)

[www.honda.at](http://www.honda.at) (abgerufen am 05.05.2010)

[www.statistik.at](http://www.statistik.at) (abgerufen am 08.07.2010)